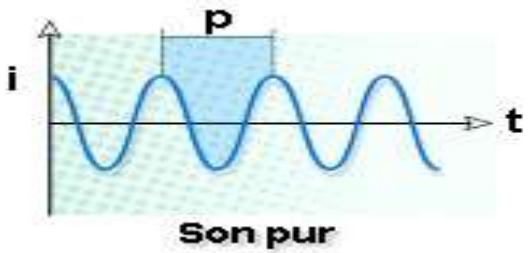
Physiologie de l'audition

Le son:

- Le son peut être défini comme représentant la partie audible du spectre des vibrations acoustique;
- prend essentiellement en compte deux paramètres des vibrations acoustiques : la
- **fréquence ou nombre de vibrations par seconde (Hertz = Hz) qui définit les sons aigus et** graves, et
- **l'intensité ou amplitude de la vibration (décibel = dB) qui définit les sons forts ou** faibles.

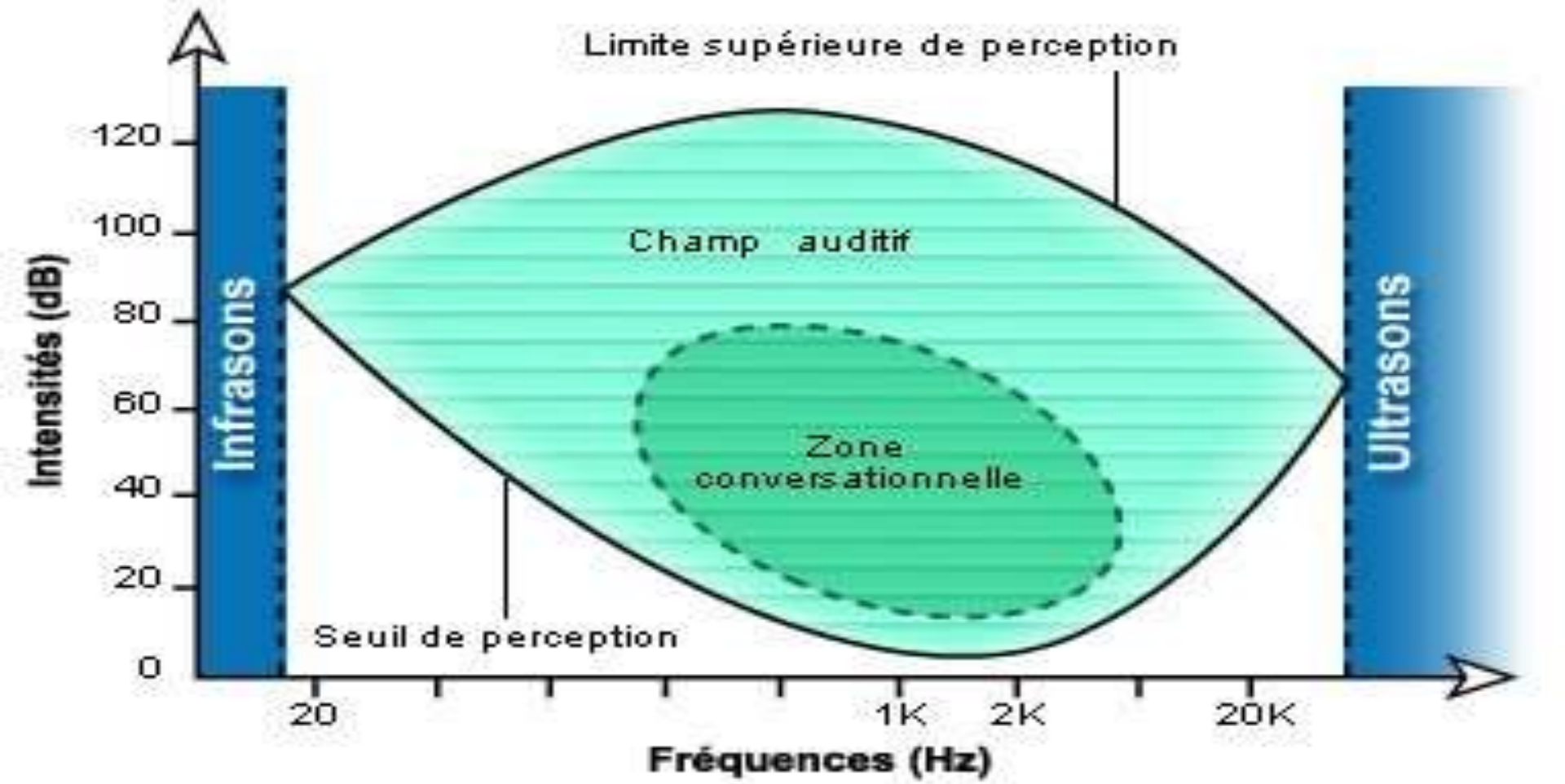


Son pur: la vibration est caractérisée par une seule fréquence.
(p=période, t=temps, i=intensité)

Son musical : à la même fréquence fondamentale que le son pur ci-dessus s'ajoutent des harmoniques (fréquences plus aiguës, multiples entiers de la fréquence fon**d**amentale) qui caractérisent le timbre de l'instrument ou de la voix.

Bruit : pas de fréquence caractéristique.

- L'oreille humaine perçoit des fréquences comprises entre **20 Hz (fréquence la plus grave) et**
- **20000 Hz (fréquence perçue la plus aiguë) mais elle est surtout sensible aux fréquences de**
- **1000 à 4000 Hz , nous qualifions d'infrasons toute fréquence** inférieure à 20 Hz.
- De même, nous qualifions d'ultrasons tout ce qui est au-delà de 20 kHz.
- Le seuil auditif, c'est-à-dire le point où le silence est rompu par un bruit audible est de **0 dB chez**
- le jeune adulte. Un son devient gênant à **120 dB et il devient douloureux à 140 dB environ**



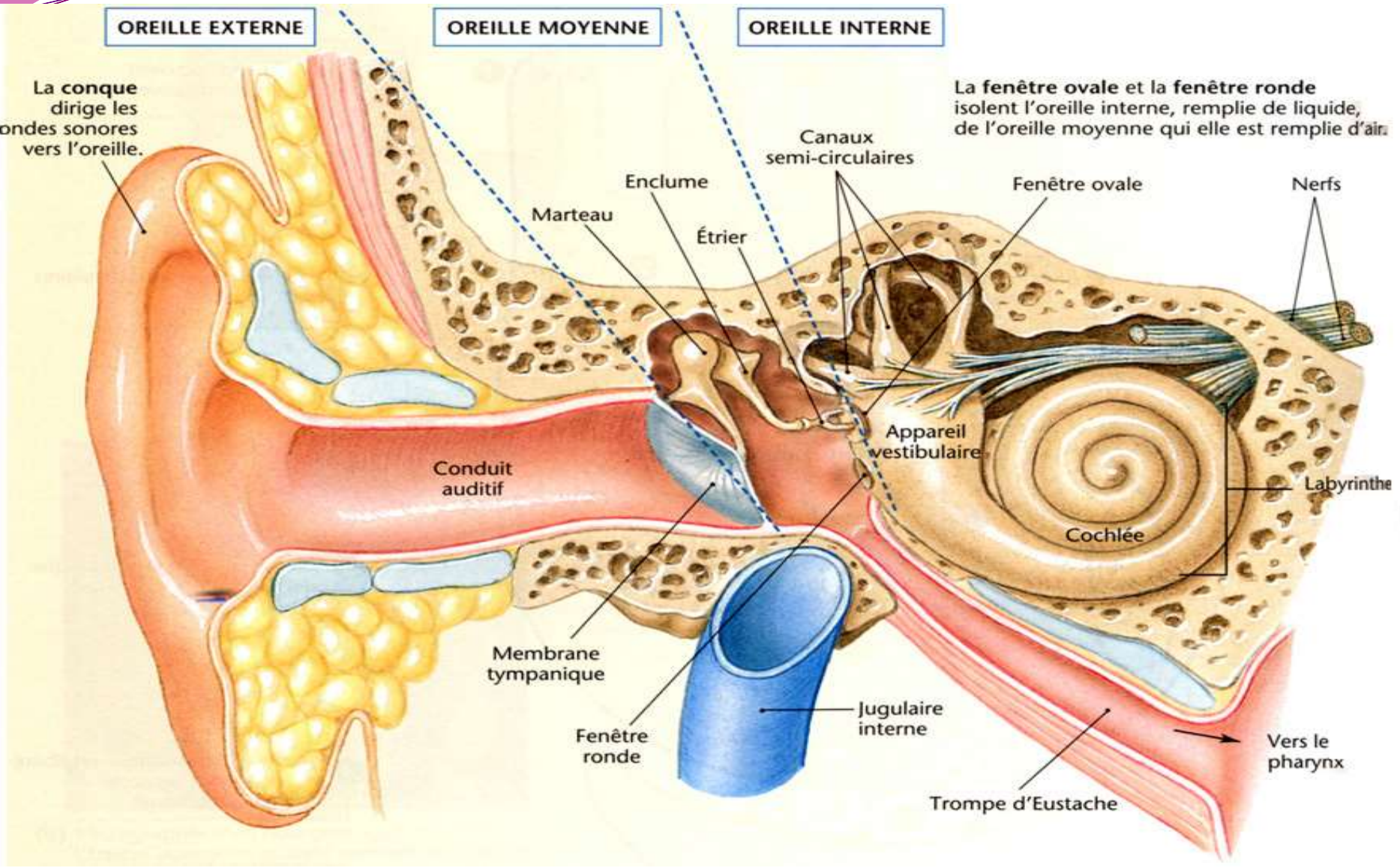
<u>Spectre audible chez l'homme</u> : compris entre 20 et 20000 Hz

<u>La bande conversationnelle</u> est située entre 300 et 3000Hz (voie humaine)

<u>Courbe audio métrique</u> établie à partir des intensités seuil de perception : (intensité sonore nécessaire et suffisante pour percevoir un son d'une fréquence choisie)

Anatomie fonctionnelle de l’oreille

- L’organe de l’audition est l’oreille
- Subdivisée en 3 parties: externe ,moyenne ,interne

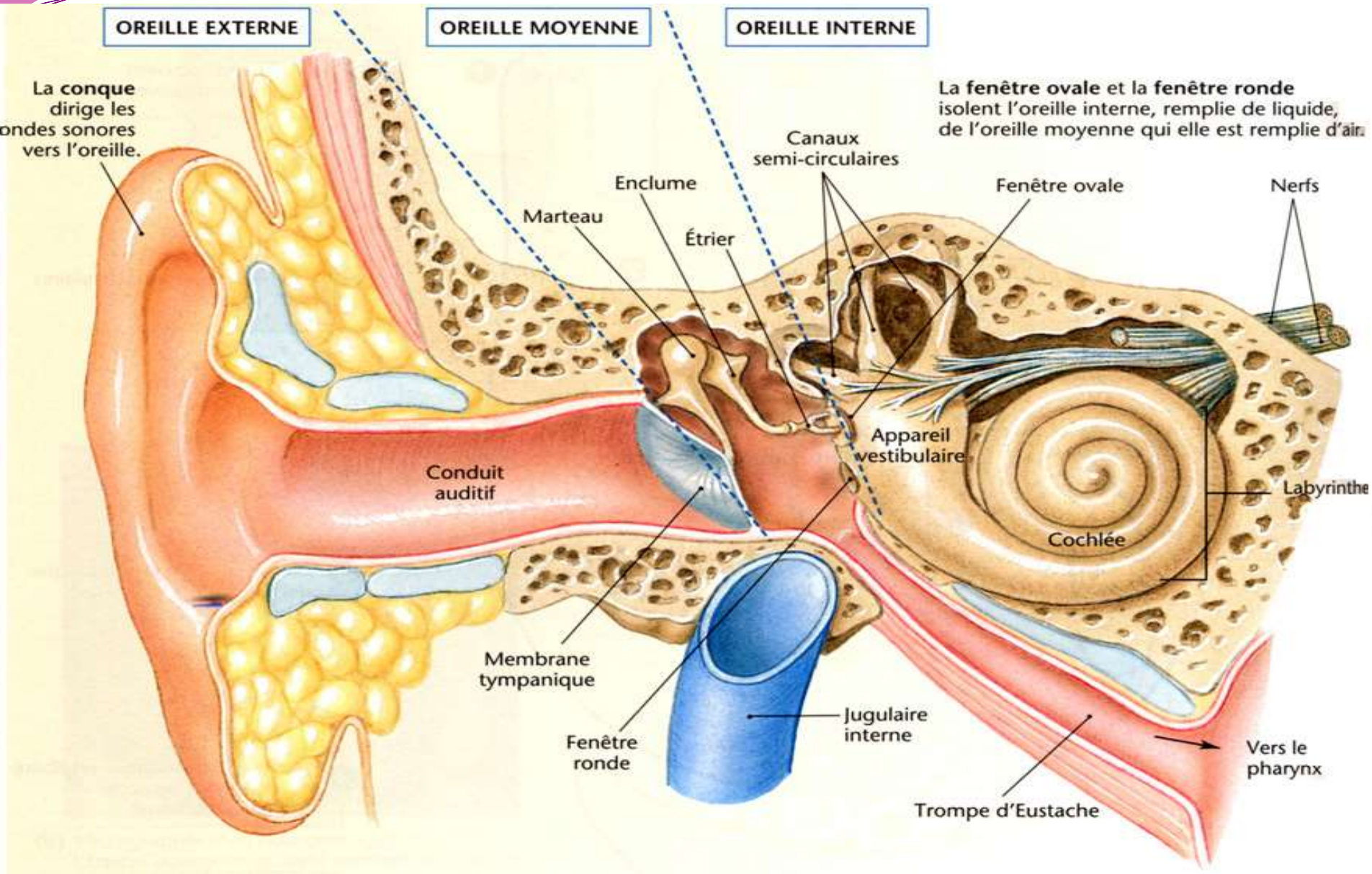

OREILLE EXTERNE
OREILLE MOYENNE
OREILLE INTERNE
La conque dirige les ondes sonores vers l'oreille.
La fenêtre ovale et la fenêtre ronde isolent l'oreille interne, remplie de liquide, de l'oreille moyenne qui elle est remplie d'air.
Canaux semi-circulaires
Enclume
Marteau
Étrier
Fenêtre ovale
Nerfs
Appareil vestibulaire
Conduit auditif
Labyrinthe
Cochlée
Membrane tympanique
Jugulaire interne
Fenêtre ronde
Vers le pharynx
Trompe d'Eustache

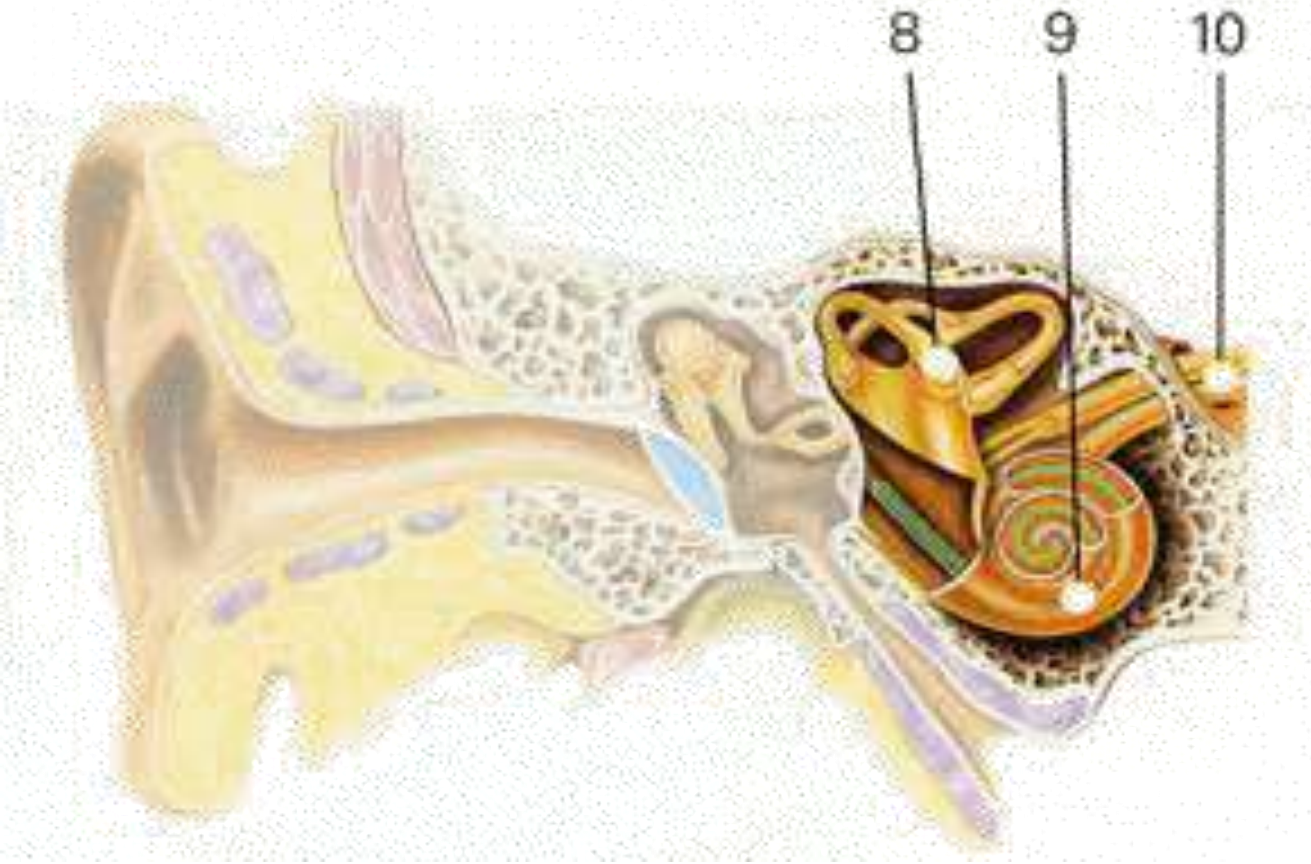
Oreille externe

- Formée du pavillon et le conduit auditif externe:2,5 cm de long
- Tapissé de cellule cérimuneuses :cérumen
- Role:
- Protéger le tympan des agressions extérieur
- De capter: antenne acoustique, amplifier et de transmettre jusque tympan les vibrations sonores
- Localisation des sons
- Participer à l'audition binaurale.

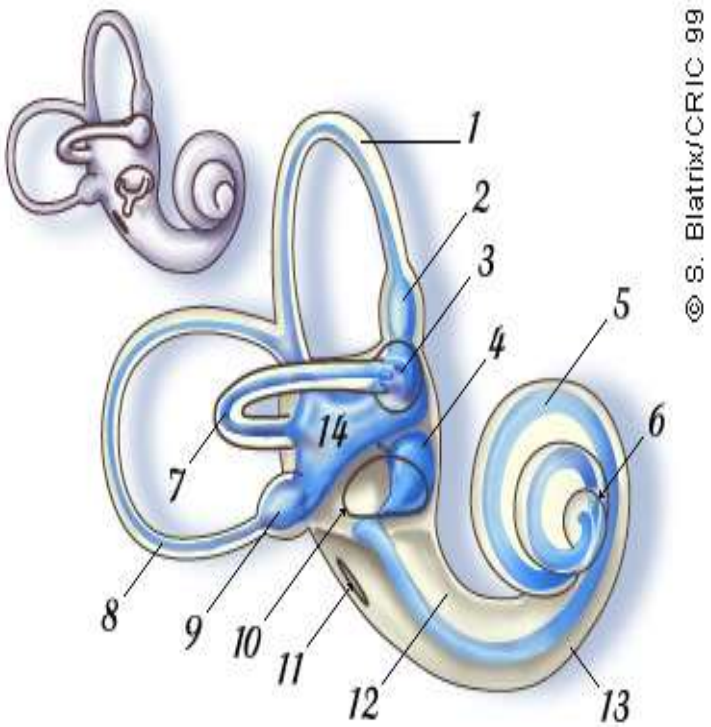
Oreille moyenne

- Comprend: la caisse du tympan, la trompe d'eustache et la chaîne des osselets: marteau, enclume et l'étrier.
- Caisse du tympan contenant de l'air fermée sur l'oreille externe par la membrane du tympan et sur l'OI par les fenêtre ronde et ovale
- Elle communique avec le pharynx par la trompe d'eustache :but créer la même pression atmosphérique sur les 2 faces du tympan


OREILLE EXTERNE
OREILLE MOYENNE
OREILLE INTERNE
La conque dirige les ondes sonores vers l'oreille.
La fenêtre ovale et la fenêtre ronde isolent l'oreille interne, remplie de liquide, de l'oreille moyenne qui elle est remplie d'air.
Canaux semi-circulaires
Enclume
Marteau
Étrier
Fenêtre ovale
Nerfs
Appareil vestibulaire
Conduit auditif
Labyrinthe
Cochlée
Membrane tympanique
Jugulaire interne
Fenêtre ronde
Vers le pharynx
Trompe d'Eustache



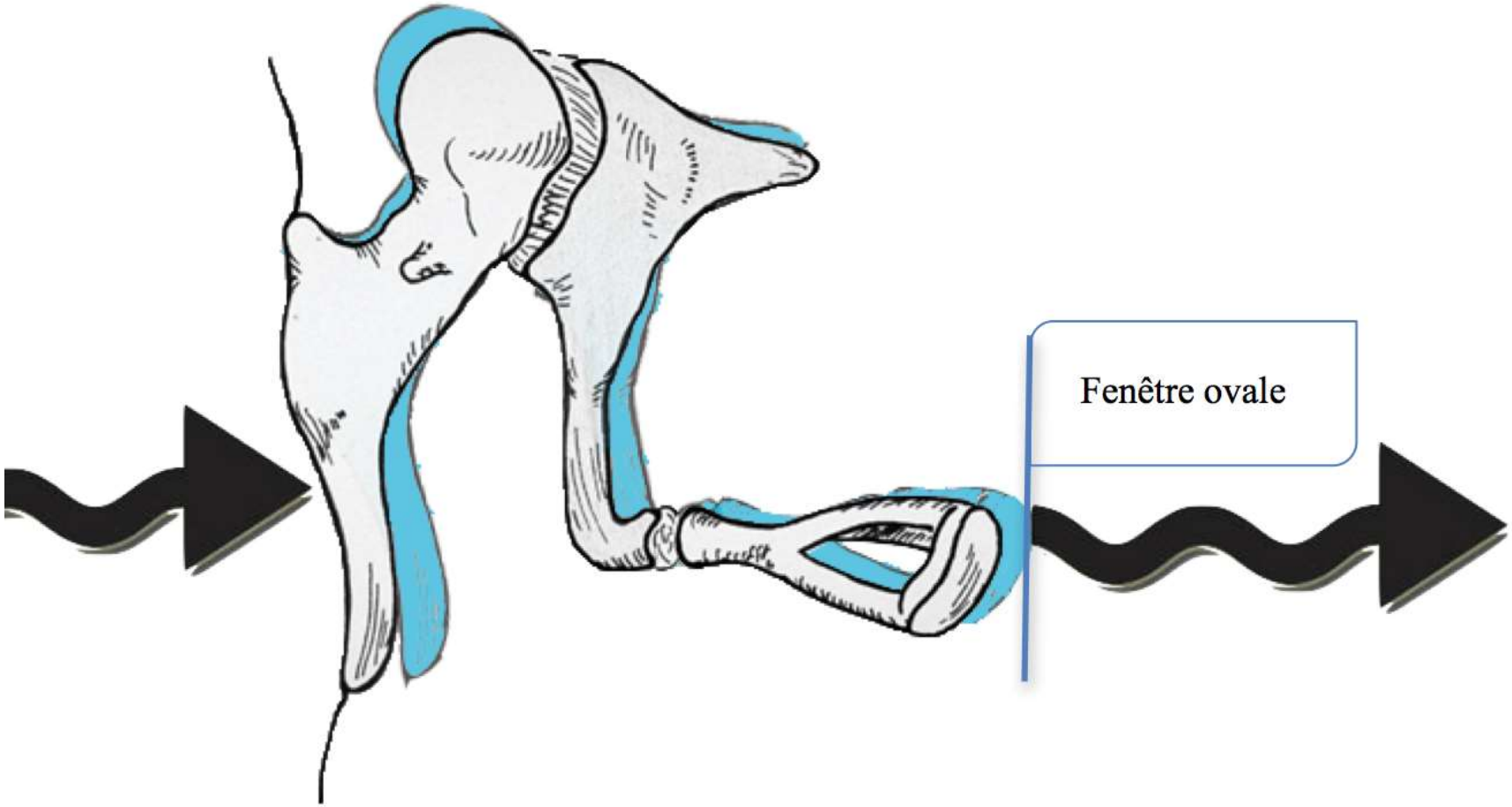
8 canaux semi-circulaires
9 Cochlée
10 Nerf cochléaire



1. Canal antérieur
2. Ampoule (du même canal)
3. Ampoule (canal horizontal)
4. Saccule
5. Canal cochléaire
6. Hélicotrème
7. Canal latéral (horizontal)
8. Canal postérieur
9. Ampoule (canal postérieur)
10. Fenêtre ovale
11. Fenêtre ronde
12. Rampe vestibulaire
13. Rampe tympanique
14. Utricule

- transmet l'énergie acoustique du tympan à l’oreille interne, en réalisant une
- **adaptation d’impédance** entre un milieu aérien et un milieu liquidien.
- L’oreille moyenne est un amplificateur de pression : de cette manière elle « récupère » l’énergie acoustique disponible dans le milieu aérien et augmente l’amplitude des stimuli mécano acoustiques dans l’oreille interne.

Chaine des osselets

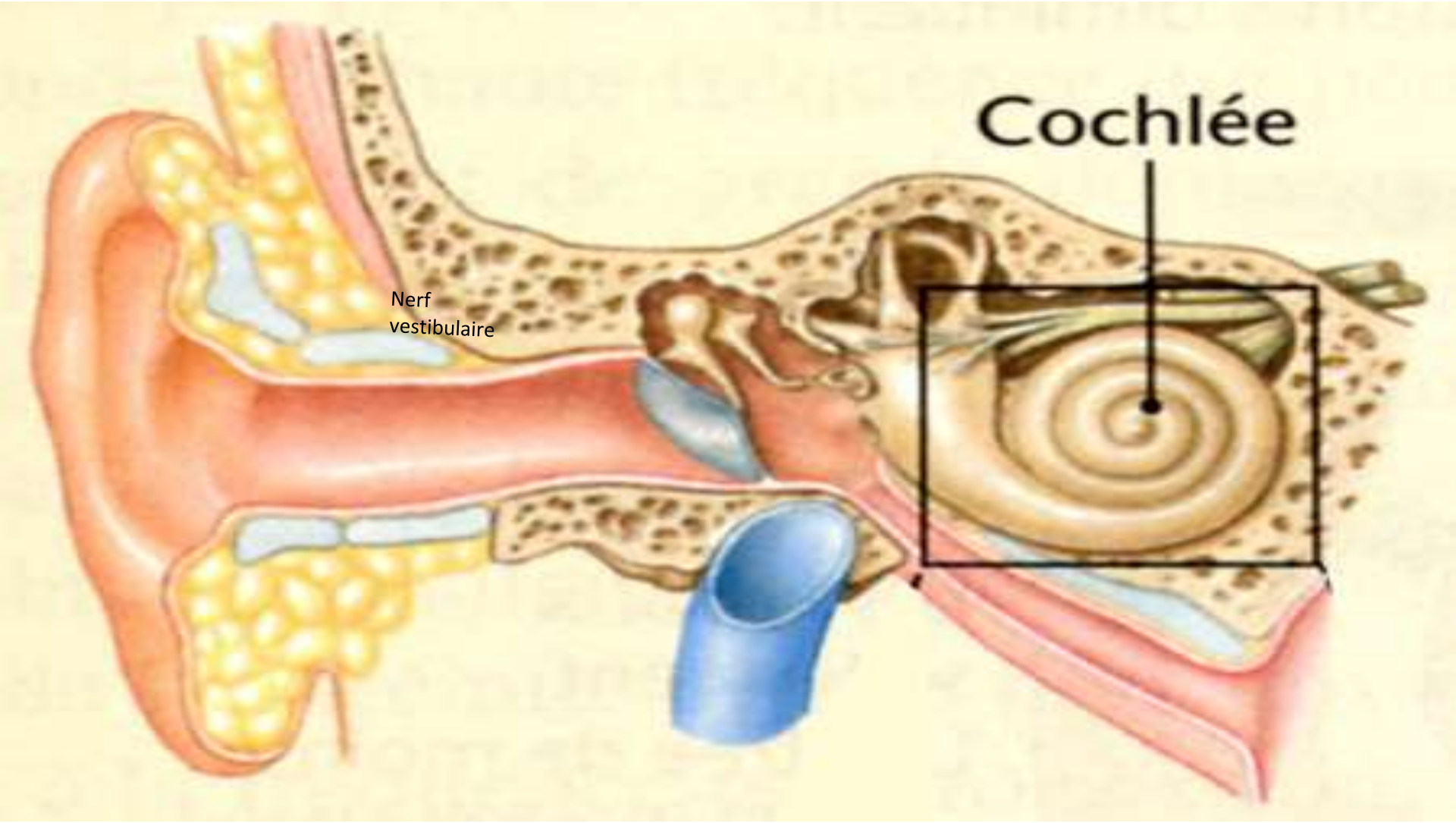


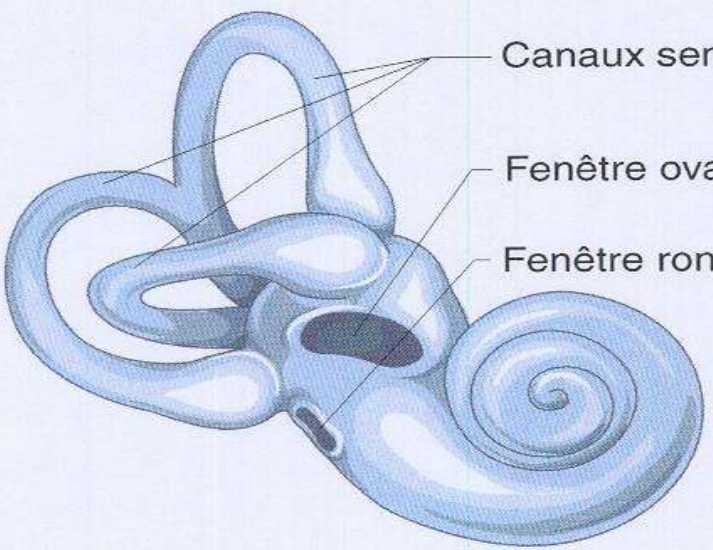
- A partir de 80 dc ,un reflexe protecteur(stapedien)est mis en place:
- La contraction du muscle stapedien innervé par le nerf facial bloque la chaine des osselets et attenue les amplitudes des vibration transmises à la fenêtre ovale.

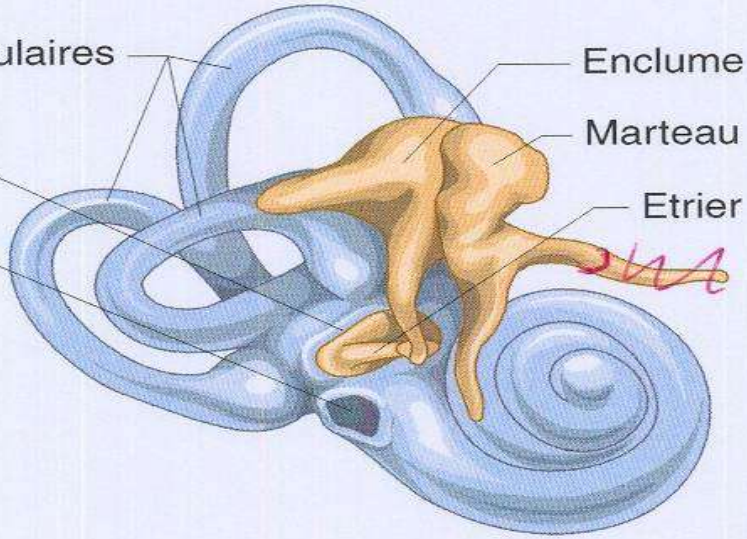
Oreille interne

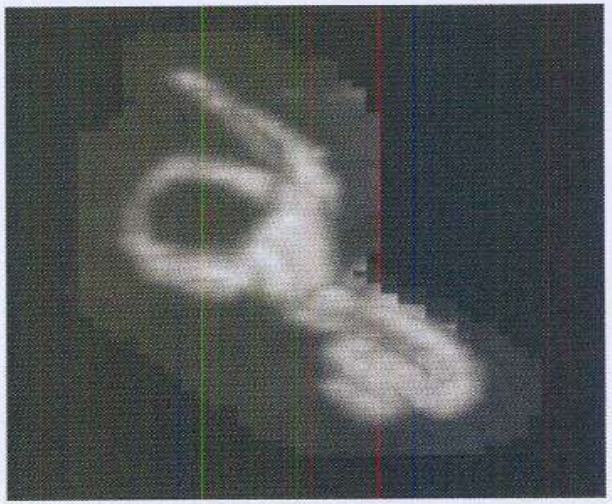
- formée d'un système complexe de canaux.
- comprend deux parties principales : le labyrinthe osseux qui contient le labyrinthe membraneux
- Le labyrinthe osseux est une série de cavités creusées dans le rocher de l'os temporal. On peut
- le subdiviser en 3 régions :
- **Les canaux semi-circulaires et le vestibule: les récepteurs de l'équilibre**
- **la cochlée, qui renferment les récepteurs de l'audition**

Oreille interne




Canaux semi-circulaires
Fenêtre ovale
Fenêtre ronde

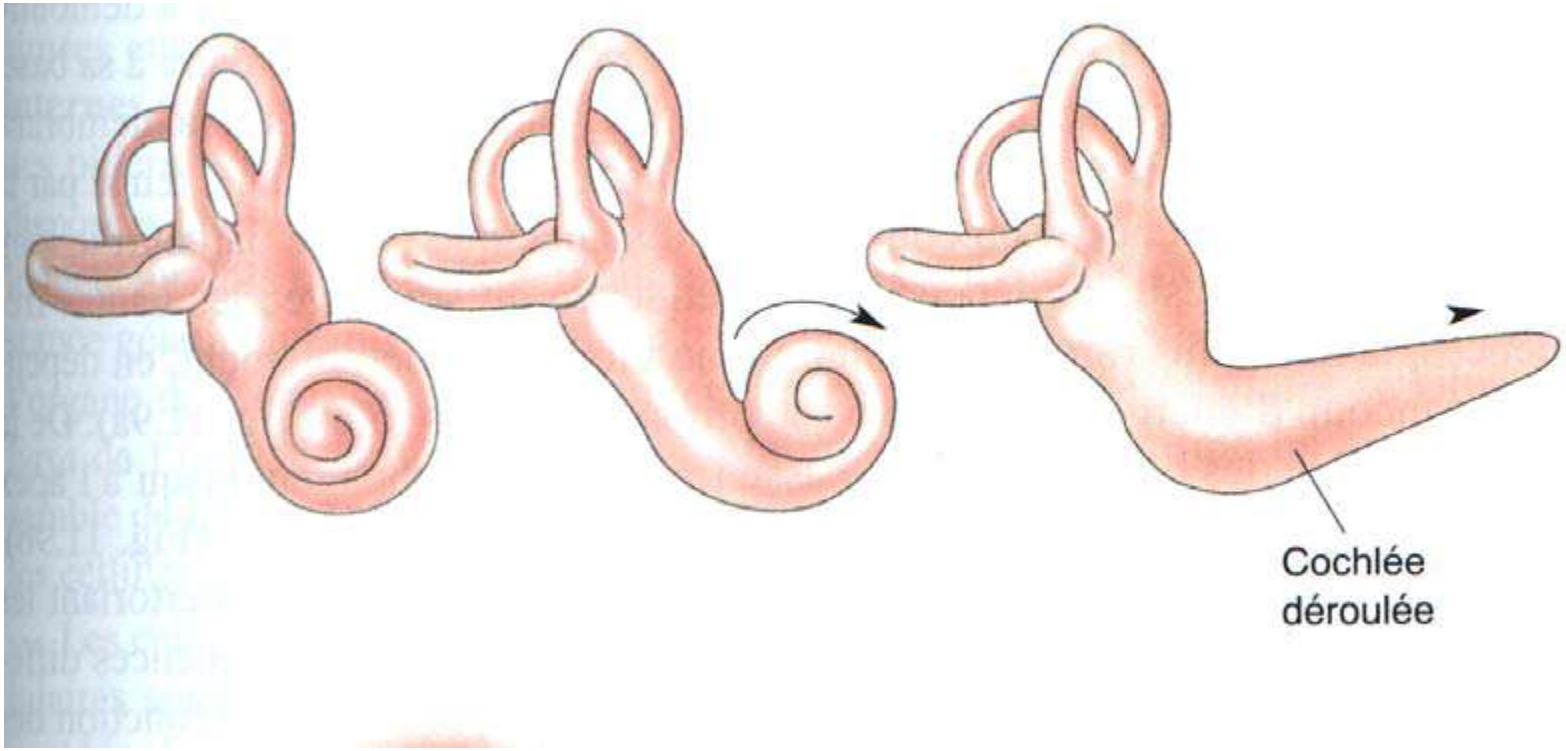

Enclume
Marteau
Etrier



cochlée

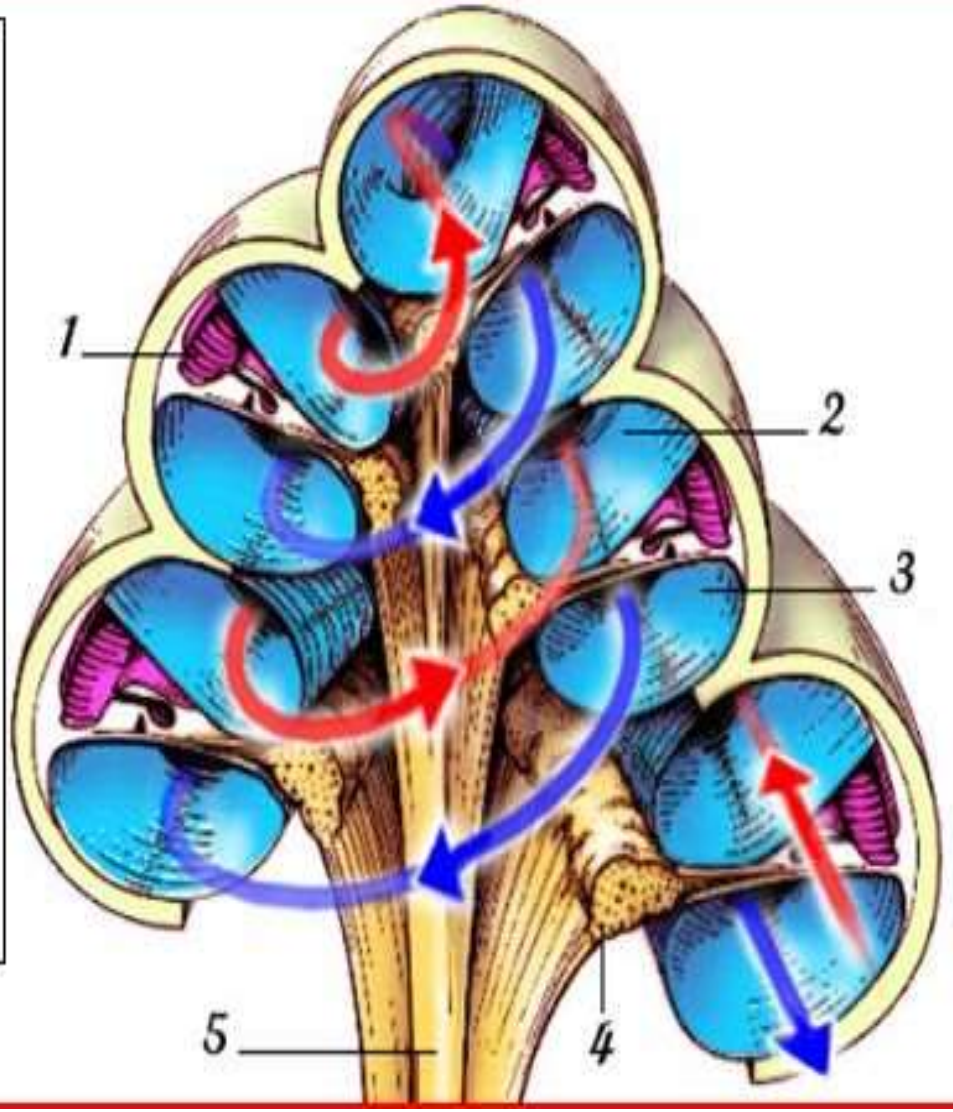
- La cochlée est un canal osseux en forme de spirale qui effectue 2tours et demi autour d'un pilier osseux
- Le tube cochléaire apparaît divisé en trois canaux, la **Rampe Vestibulaire, la Rampe Tympanique et la Rampe Médiane ou canal cochléaire qui gardent la même disposition spatiale**
- . La rampe vestibulaire débouche sur la fenêtre ovale
- la rampe tympanique débouche sur la fenêtre ronde. Ces deux rampes sont remplies de **périlymphe** liquide de type extracellulaire .
- Le canal cochléaire contient un liquide :**l'endolymphe, de type intracellulaire très riche en K**

Cochlée déroulée



cochlée

Pour mieux visualiser la coupe, elle est représentée de cette manière :



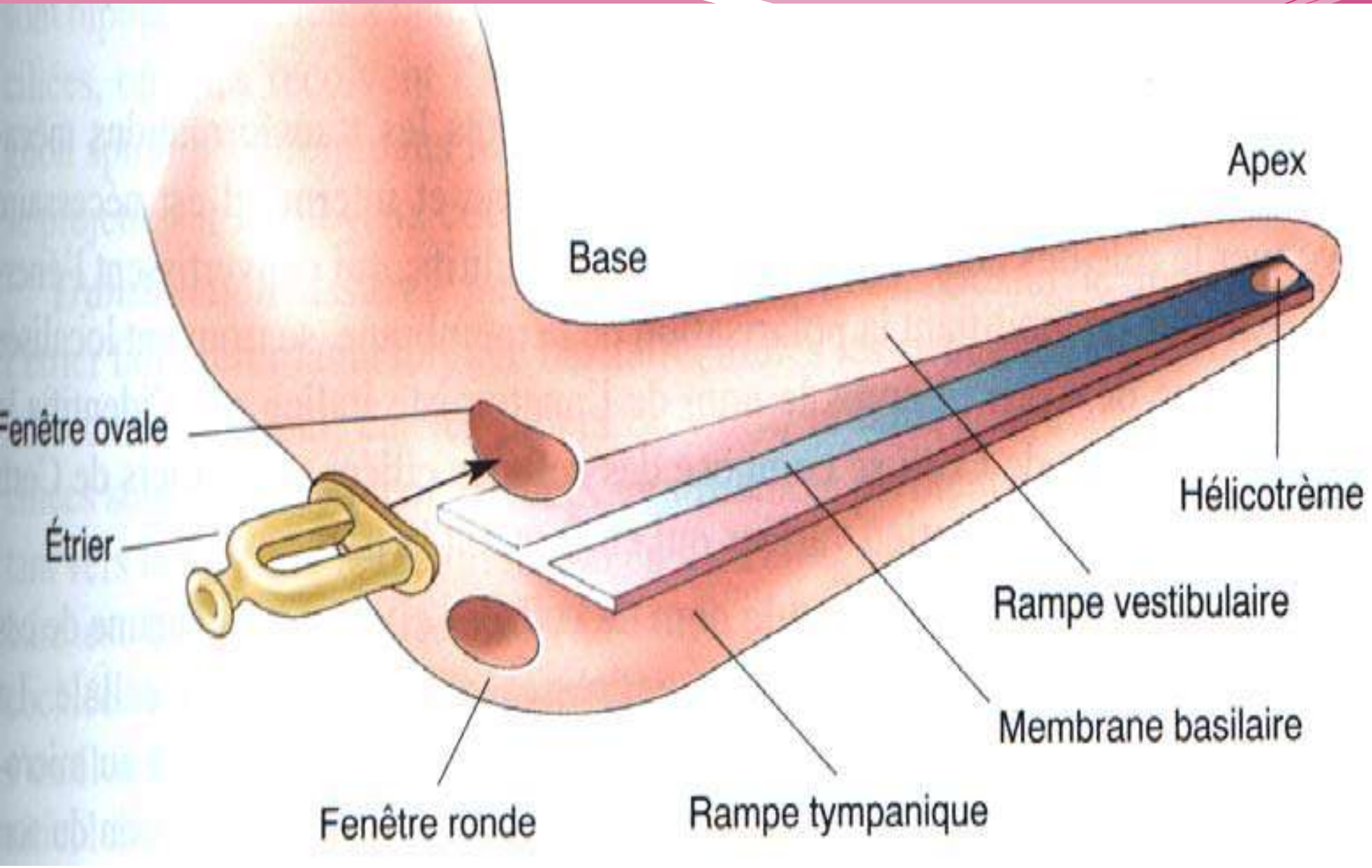
1 : Canal cochléaire

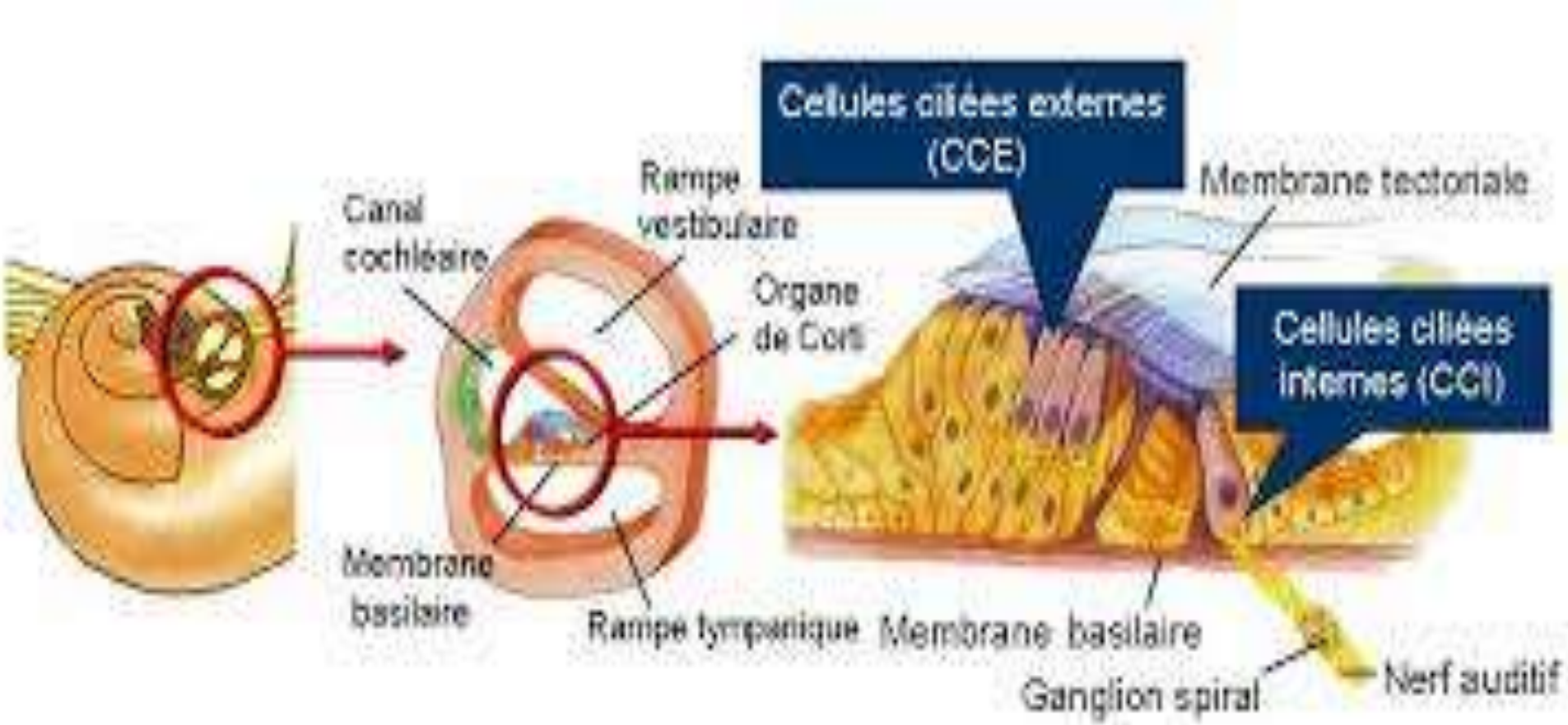
2 : Rampe vestibulaire

3 : Rampe tympanique

4 : Ganglion spiral

5 : Fibres du nerf cochléaire


Apex
Base
Fenêtre ovale
Étrier
Hélicotrème
Rampe vestibulaire
Membrane basilaire
Fenêtre ronde
Rampe tympanique

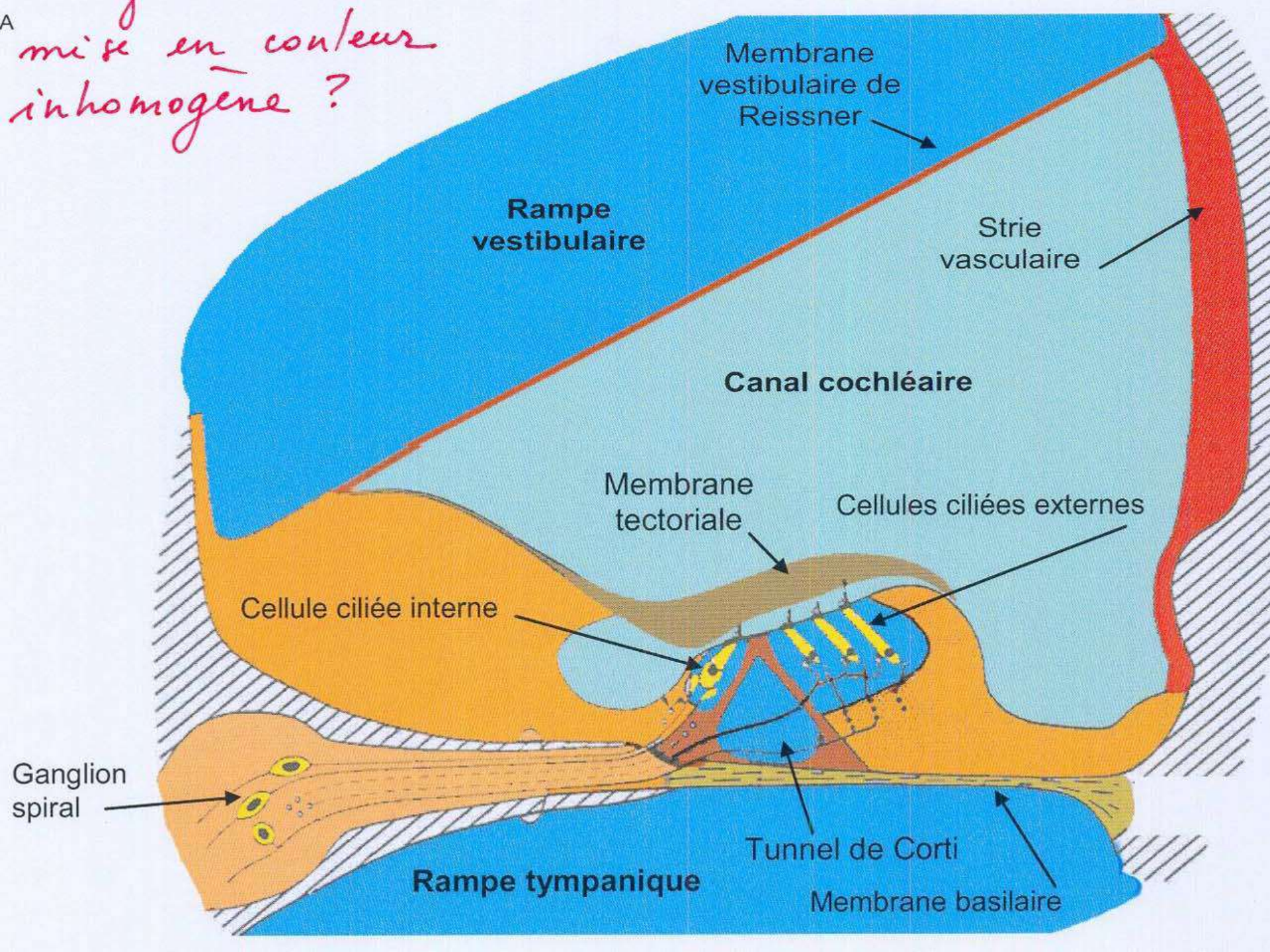

Cellules ciliées externes (CCE)
Membrane tectoriale
Rampe vestibulaire
Canal cochléaire
Organe de Corti
Cellules ciliées internes (CCI)
Membrane basilaire
Rampe tympanique
Membrane basilaire
Ganglion spiral
Nerf auditif

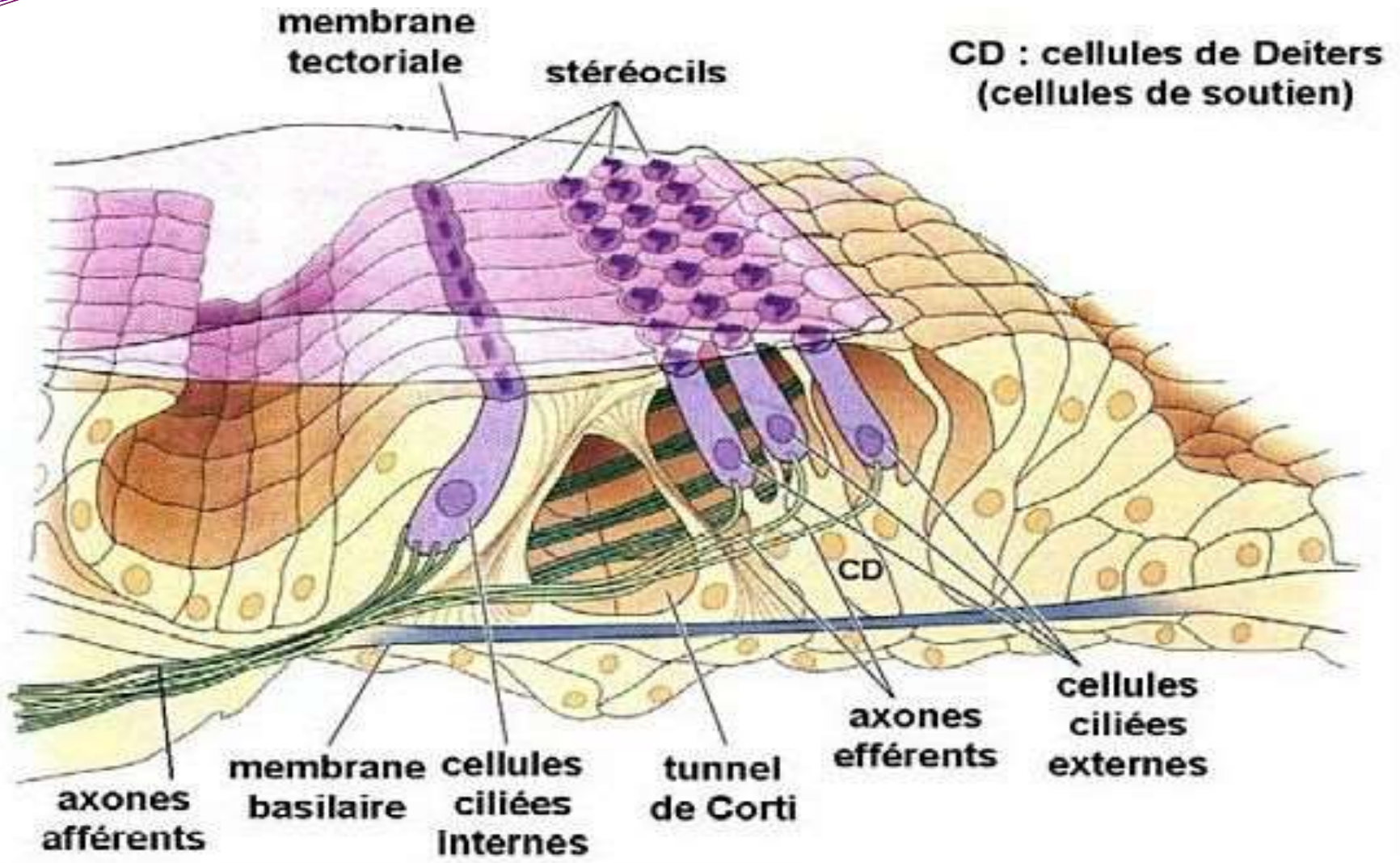
Organe de corti

- Récepteur auditif
- Situé dans le canal cochléaire et repose sur la membrane basilaire
- Constitué de c réceptrices primaires disposées autour du tunnel de corti
- 1 rangées de 3500 cellule c auditives interne et 3 rangées de:4000 cellules auditives externes et de la membrane tectorielle.

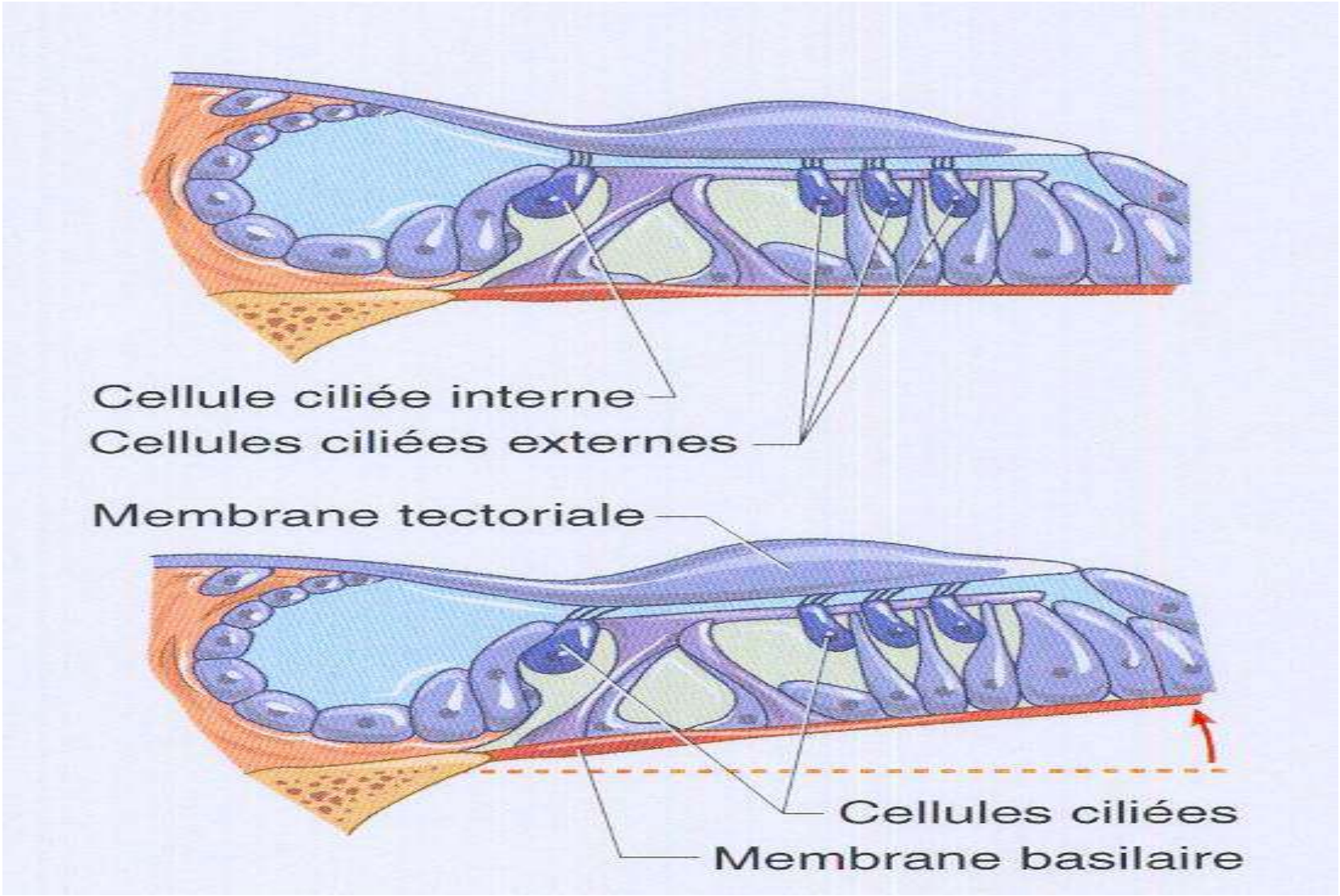
A

mise en couleur inhomogène ?




membrane tectoriale
stéréocils
CD : cellules de Deiters (cellules de soutien)
CD
axones afférents
membrane basilaire
cellules ciliées internes
tunnel de Corti
axones efférents
cellules ciliées externes

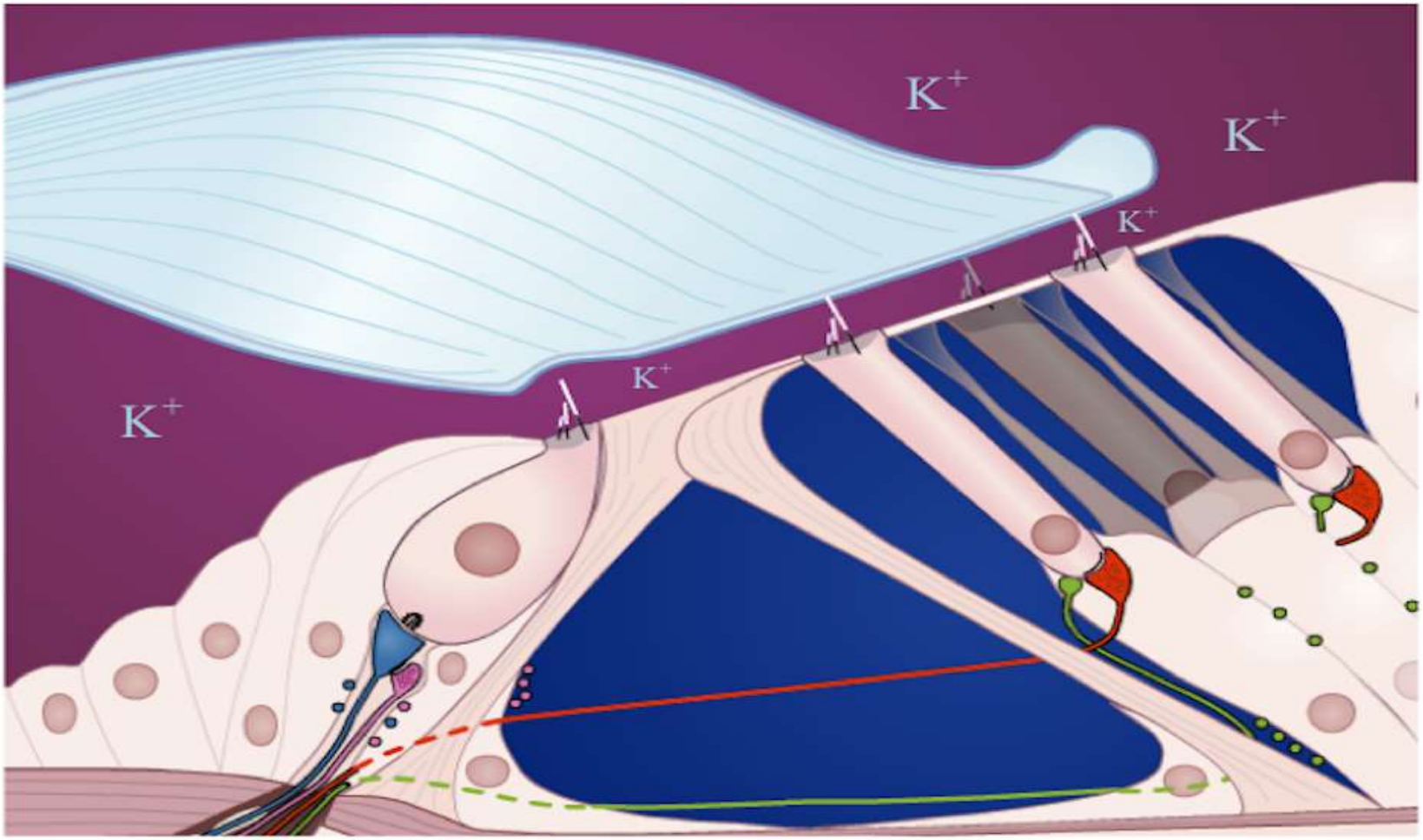
Kandel


Cellule ciliée interne
Cellules ciliées externes
Membrane tectoriale
Cellules ciliées
Membrane basilaire

	La périlymphe	L'endolymphe
Na+	150	1
K+	7	150
Cl-	110	130
Pr	1g/l	0,3g/l

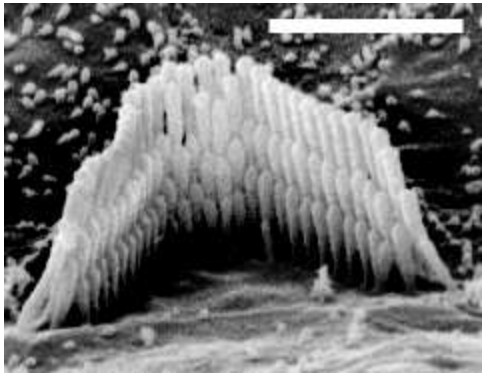
Composition ionique (nM/l)

LE POTENTIEL ENDOLYMPHATIQUE EST DE 80 Mv DEPEND D'UNE SECRETION ACTIVE DE K+ PAR LA STRIE VASCULAIRE ;
LA DDP EXISTANT ENTRE LE MILIEU INTRACELLULAIRE ET MILIEU ENDOLYMPHATIQUE EST IMPORTANTE (150mV)
-IMPORTANCE POUR LES PHENOMENES DE TRANSDUCTION DES CELLULES CILIÉES SENSORIELLES

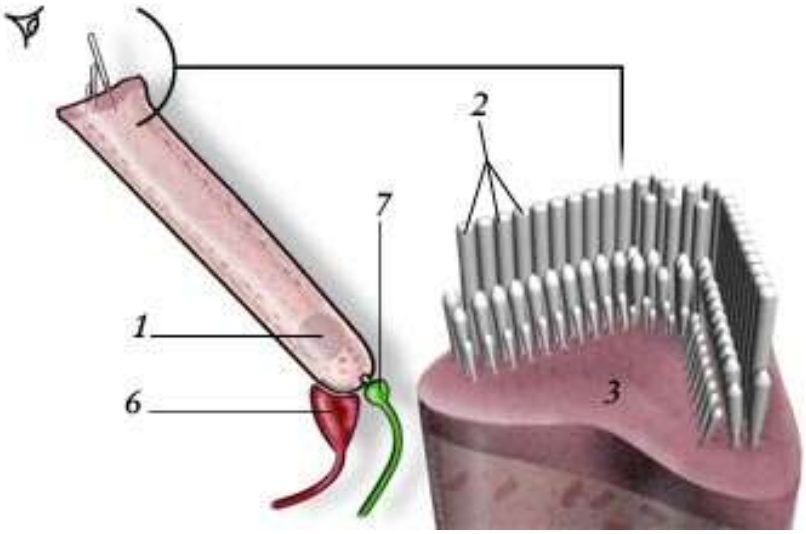

K+
K+
K+
K+
K+

Cellules auditives

- Nommée cellule ciliées :leur pôle apical comporte 3 rangées de cils en contact avec l'endolymphe
- Alignées pour les internes
- En V pour les externes
- Les cils les plus externes ou kinocilium sont grands et sont attachés à la membrane tectorielle.
- L'extremité de chaque cil est attachée par des liens; tip links à l'extrémité de l'autre cil



CCE :organisation des stereocil en W



3500 CCI et 12500 CCE

1 : noyau

2 : stereocil

3 : plaque cuticulaire

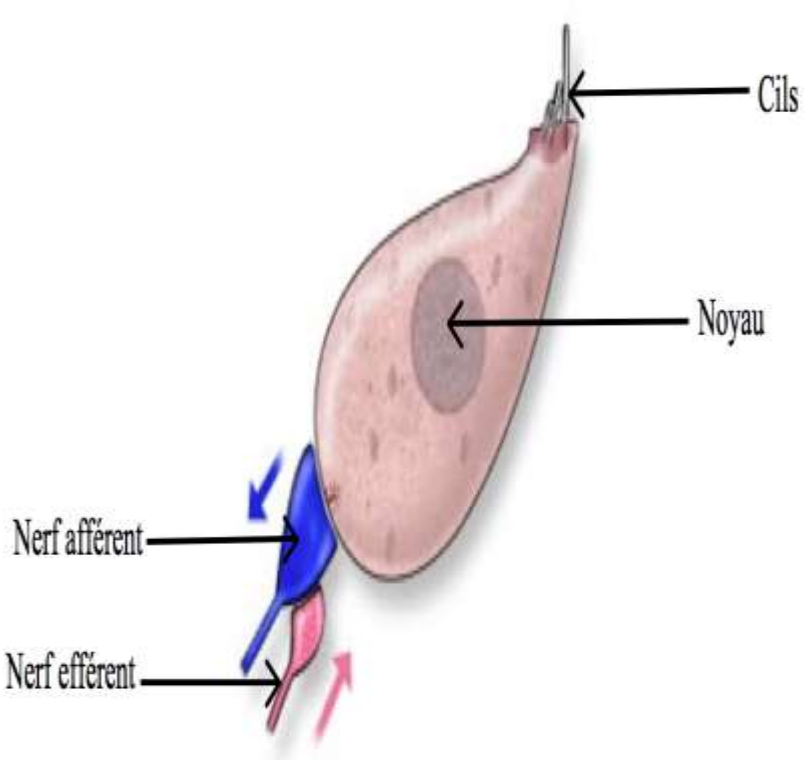
4 : nerf auditif (neurone type I)

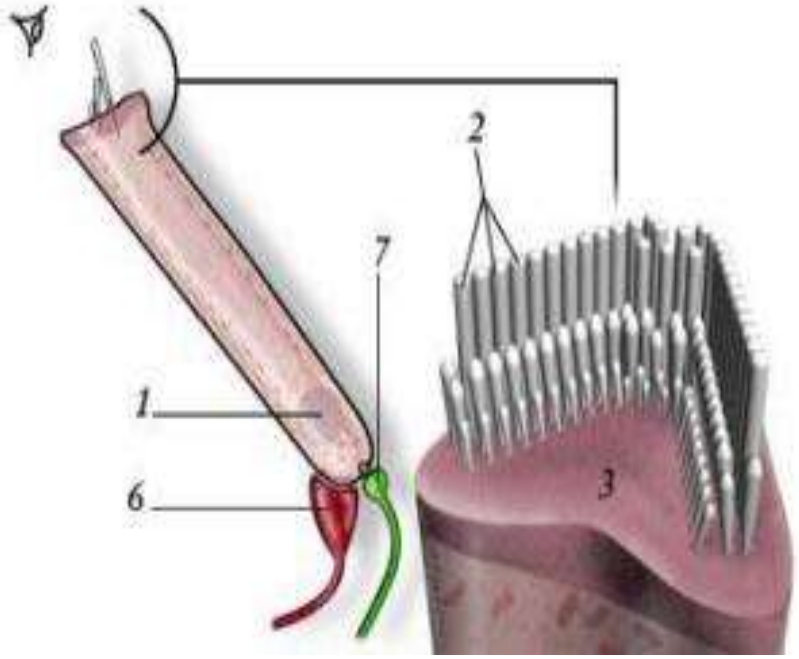
5 : efferences laterales

6 : efferences medianes

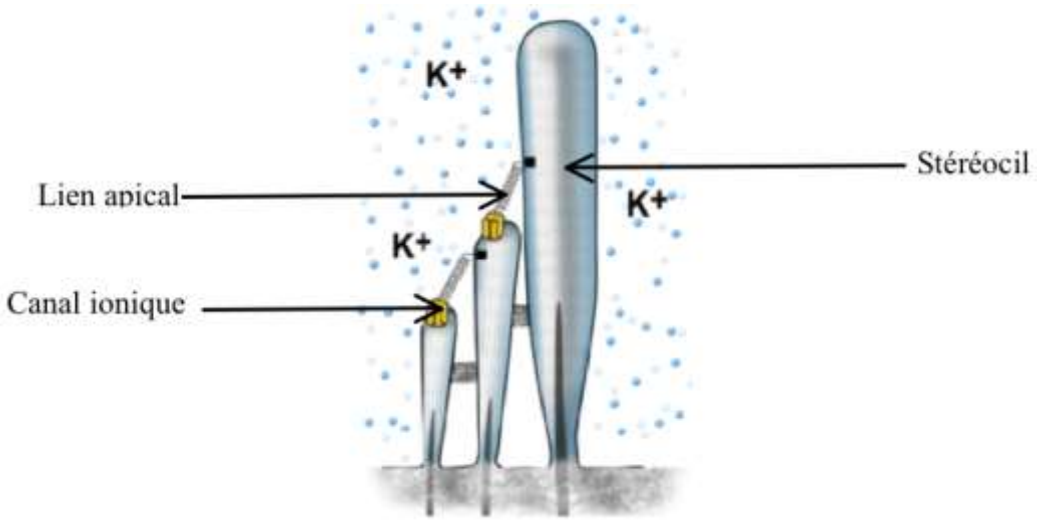
7 : nerf auditif (neurones type II)

Cellules ciliées





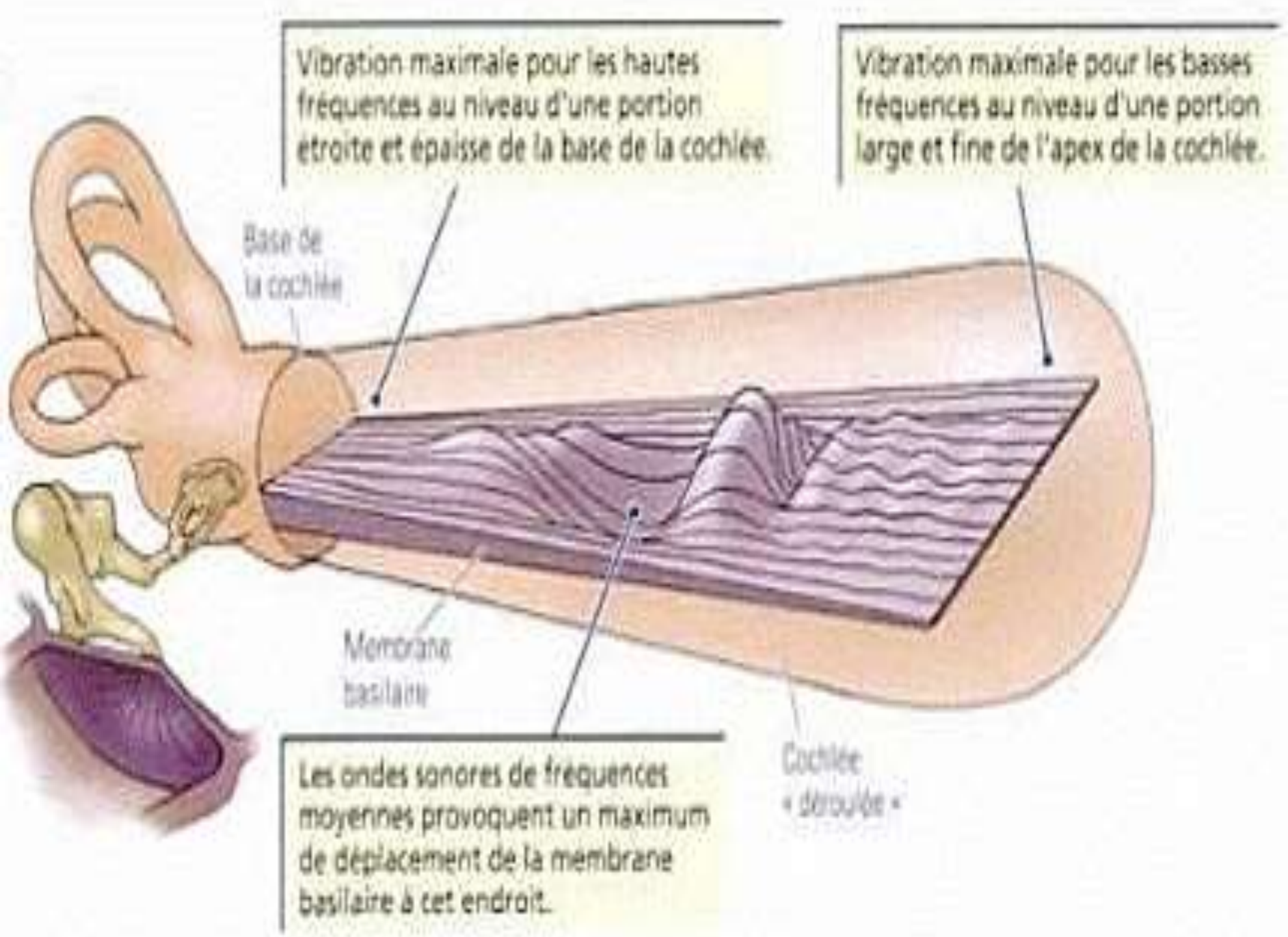
1. Noyau, 2. Stéréocils, 3. Plaque cuticulaire, , 5. Efférence latérale, 6. Efférence médiane, 7. Nerf auditif (neurone de type II)


K+
Stéréocil
Lien apical
K+
K+
Canal ionique

- Au pole basal de la cellule se trouve des synapses glutaminergiques aves les dendrites des cellules sensorielles secondaires
- Des synapse cholinergiques avec des axones afférents venant de fibres centrifuges.

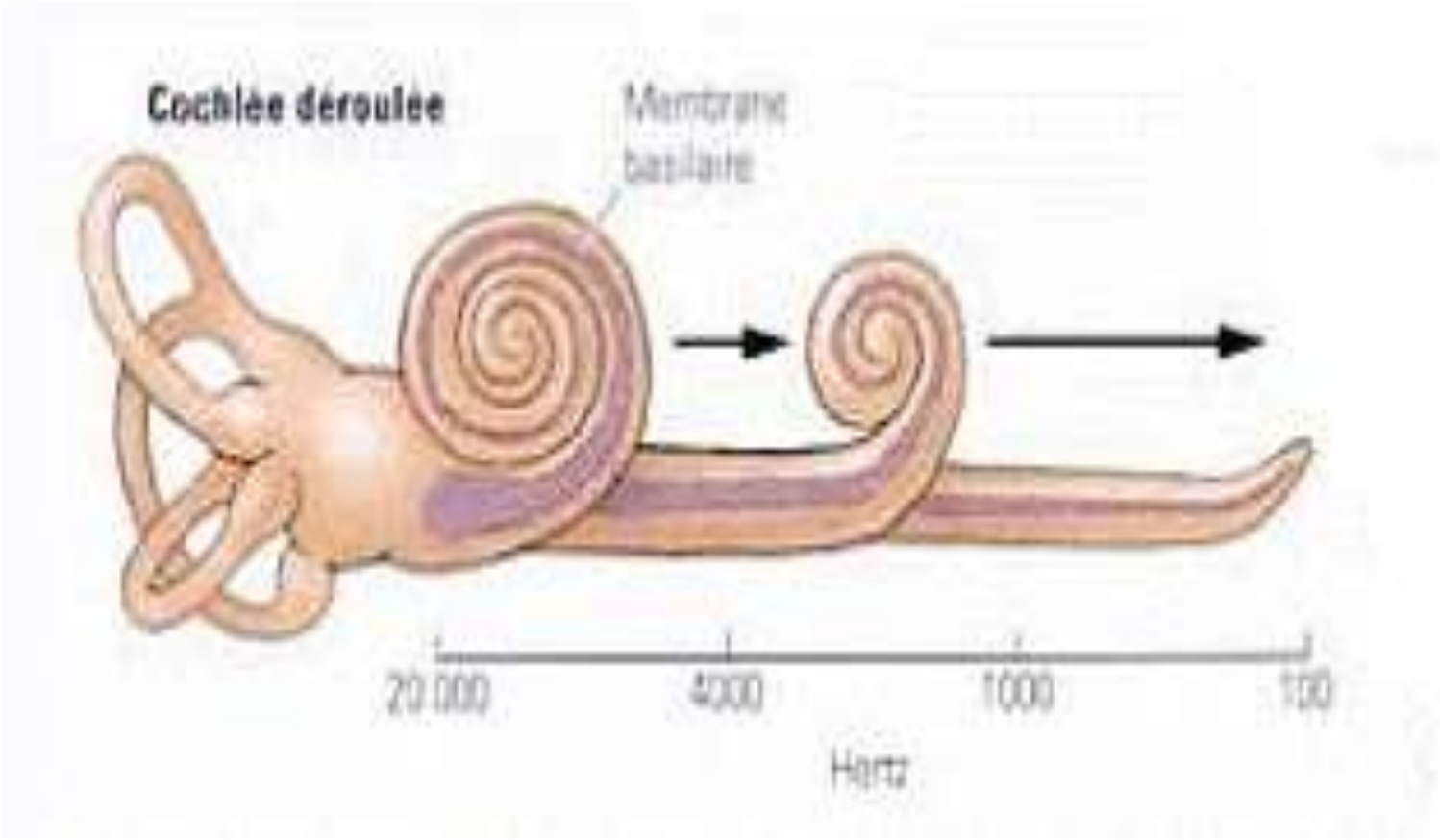
Propagation des ondes sonores

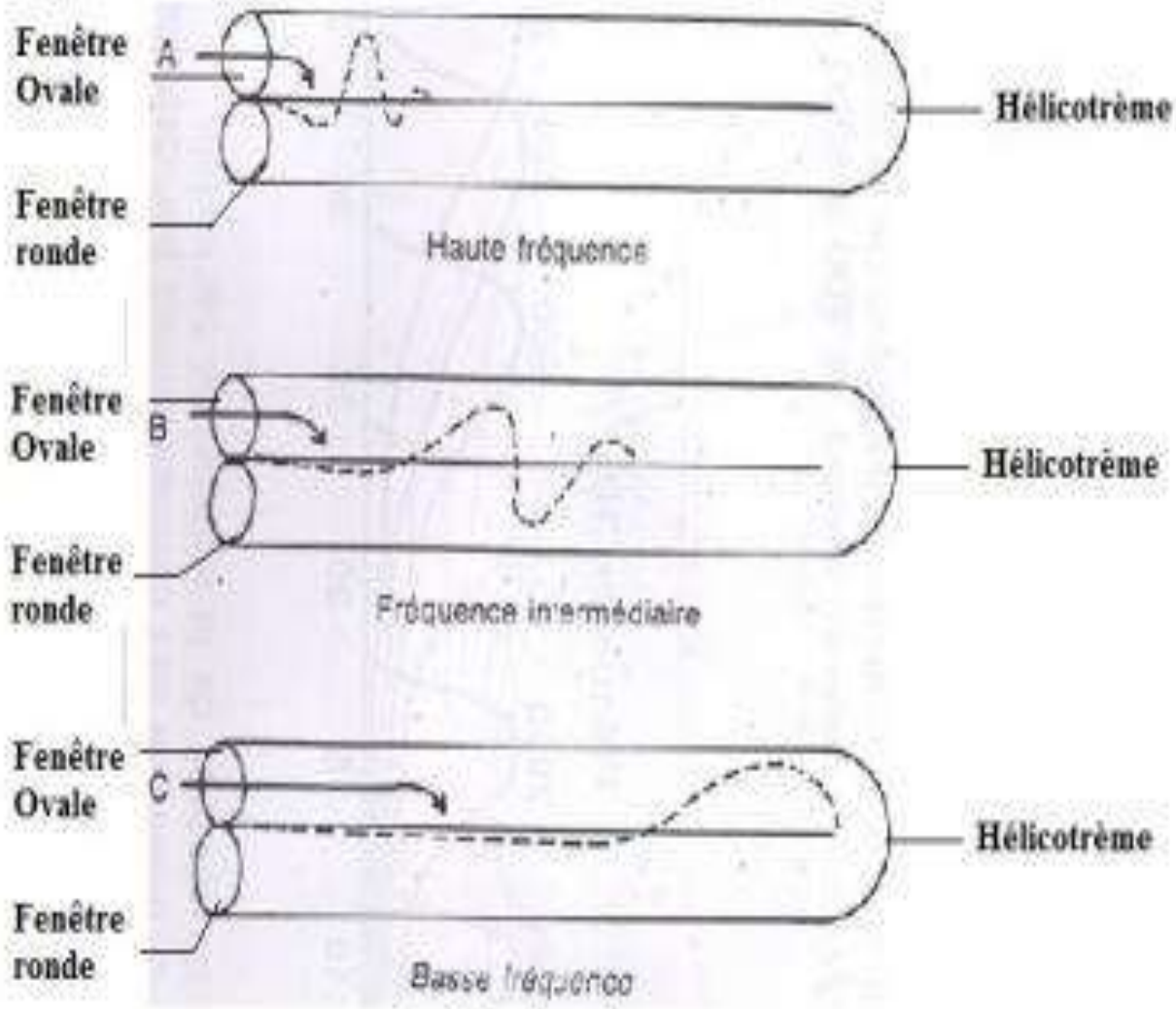
- **1) Le pavillon dirige les ondes sonores dans le conduit auditif externe.**
- **2) Lorsque les ondes sonores frappent la membrane tympanique (tympan), elle vibre d'avant en arrière.**
- **L'amplitude dépend de la fréquence et de la force des ondes sonores qui la frappent. vibre lentement pour les sons de faible fréquence et elle vibre rapidement en réponse à des sons de haute fréquence.**
- **3) La région centrale de la membrane tympanique est reliée au marteau qui se met à vibrer.**
- **Les variations sont ensuite transférées à l'enclume puis à l'étrier.**
- **4) Le mouvement d'avant en arrière de l'étrier pousse la membrane de la fenêtre ovale vers l'intérieur et vers l'extérieur.**
- **5) Le mouvement de la fenêtre ovale engendre des ondes hydrauliques dans la périlymphe de la cochlée.**
- **Les vibration sonores font donc vibrer la membrane basilaires en fonction de l'amplitude du son.**


Vibration maximale pour les hautes fréquences au niveau d'une portion étroite et épaisse de la base de la cochlée.
Vibration maximale pour les basses fréquences au niveau d'une portion large et fine de l'apex de la cochlée.
Base de la cochlée
Membrane basilaire
Les ondes sonores de fréquences moyennes provoquent un maximum de déplacement de la membrane basilaire à cet endroit.
Cochlée « déroulée »

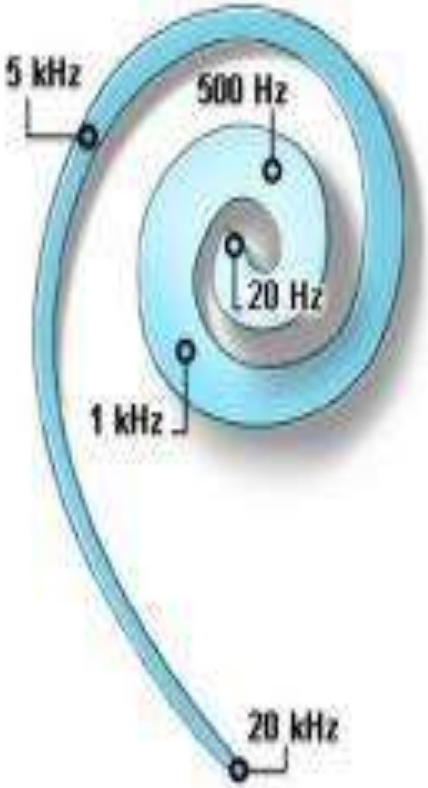
Tonotopie cochléaire

- Les ondes sonores de fréquences variées entraînent certaines régions de la membrane basilaire à vibrer plus que d'autre.
- La membrane basilaire est plus étroite mais plus rigide à la base de la cochlée ; les sons de haute fréquence induisent des vibrations maximales dans cette région.
- Vers l'apex de la cochlée, la membrane basilaire est plus large mais plus flexible
- les sons de basse fréquence entraînent une vibration maximale de la membrane basilaire dans cette région


Cochlée déroulée
Membrane basilaire
20 000
4000
1000
100
Hertz

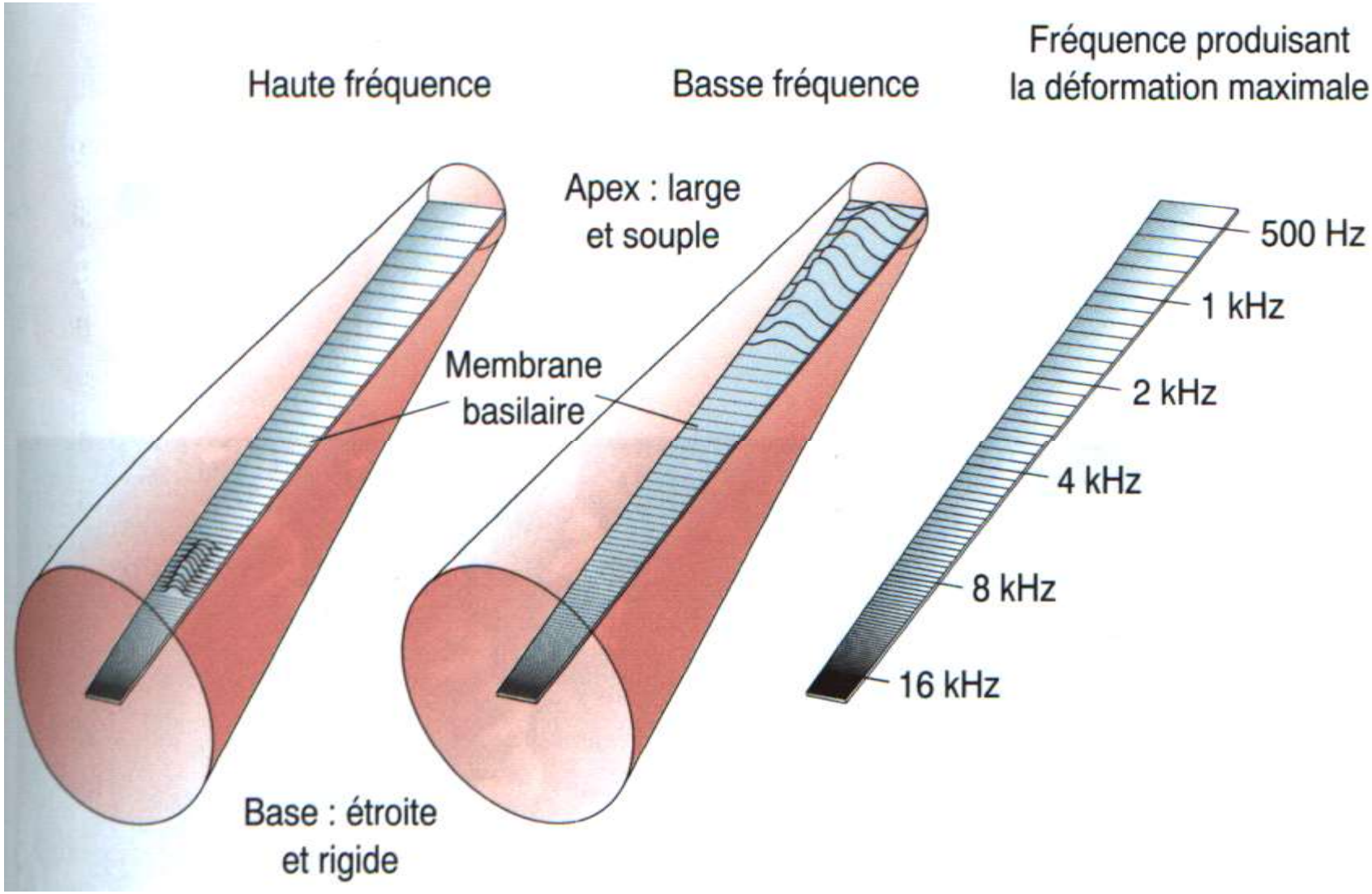


Cochlée déroulé

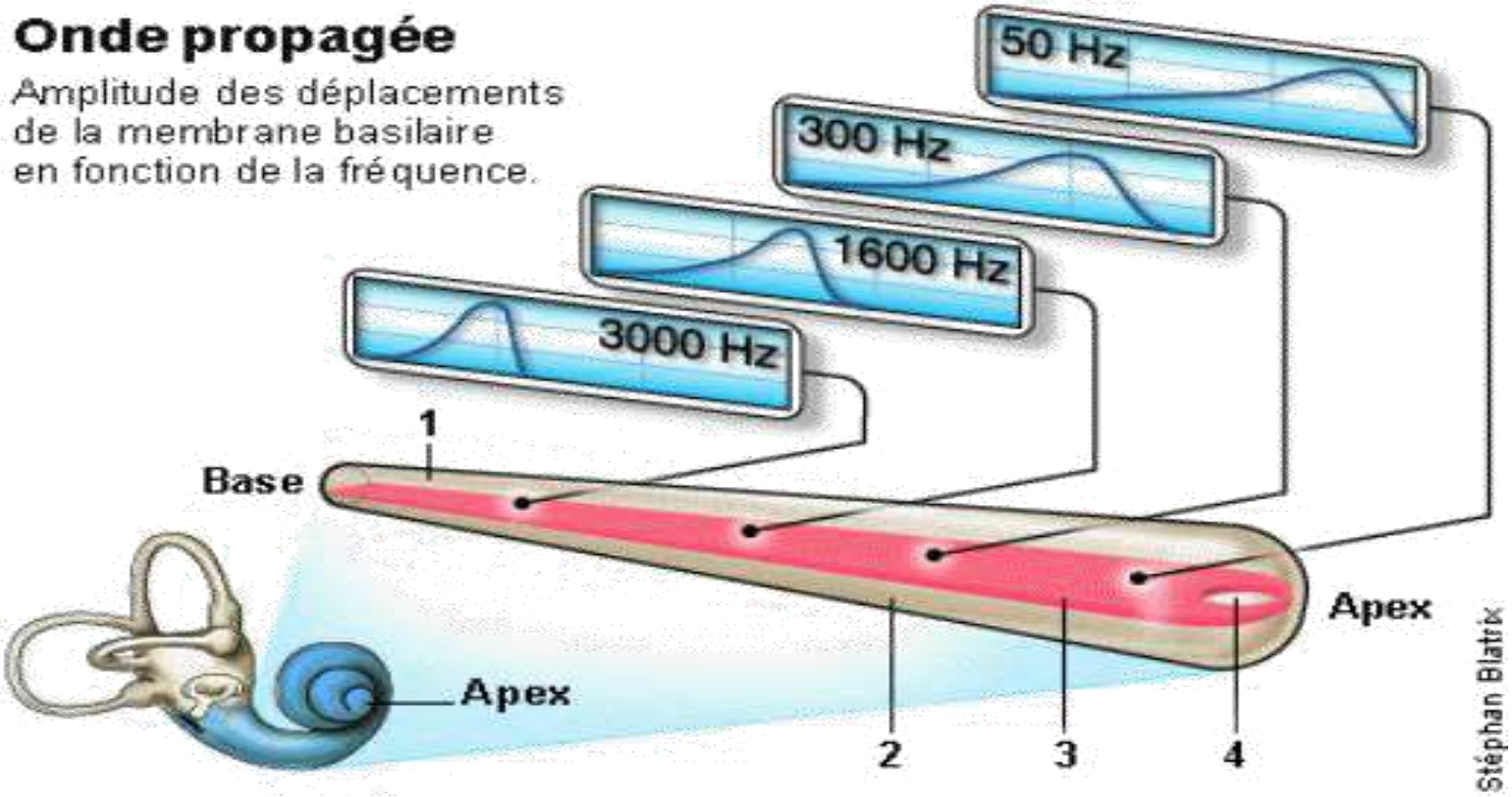


Tonotopie Cochléaire

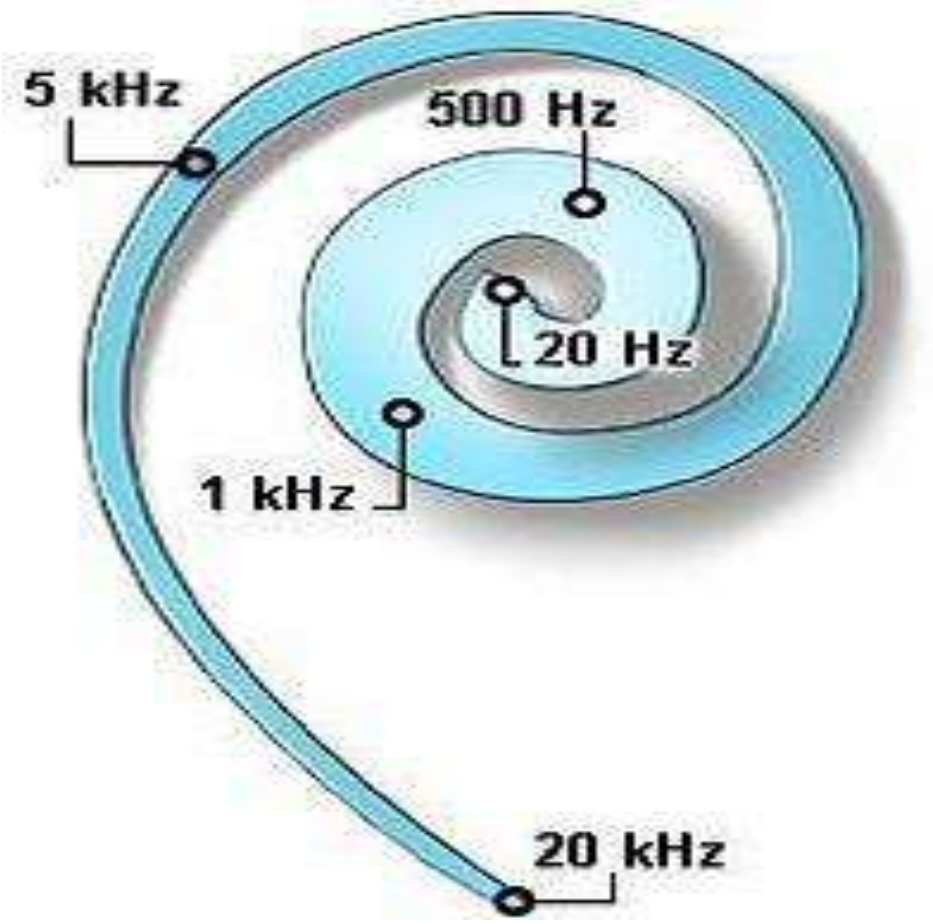
Tonotopie passive



Tonotopie passive



Tonotopie passive



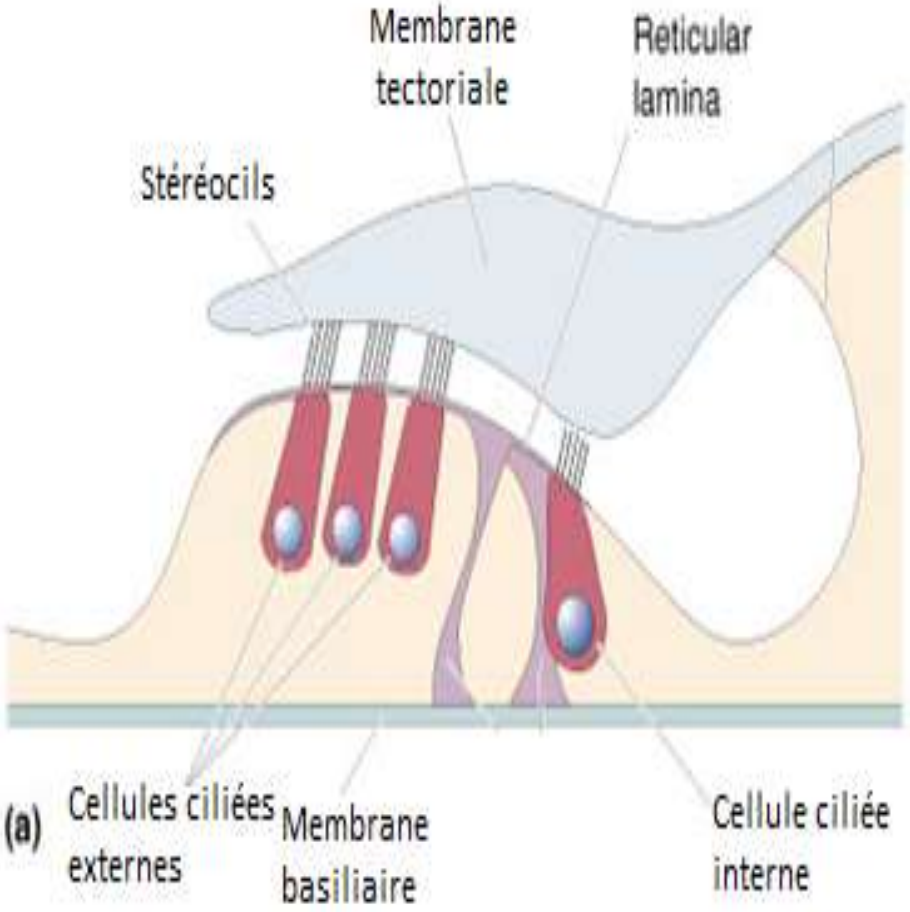
- Le codage des sons va dépendre de la position sur la membrane basilaire des cellules sensorielles qui sont identiques de la base à l’apex.

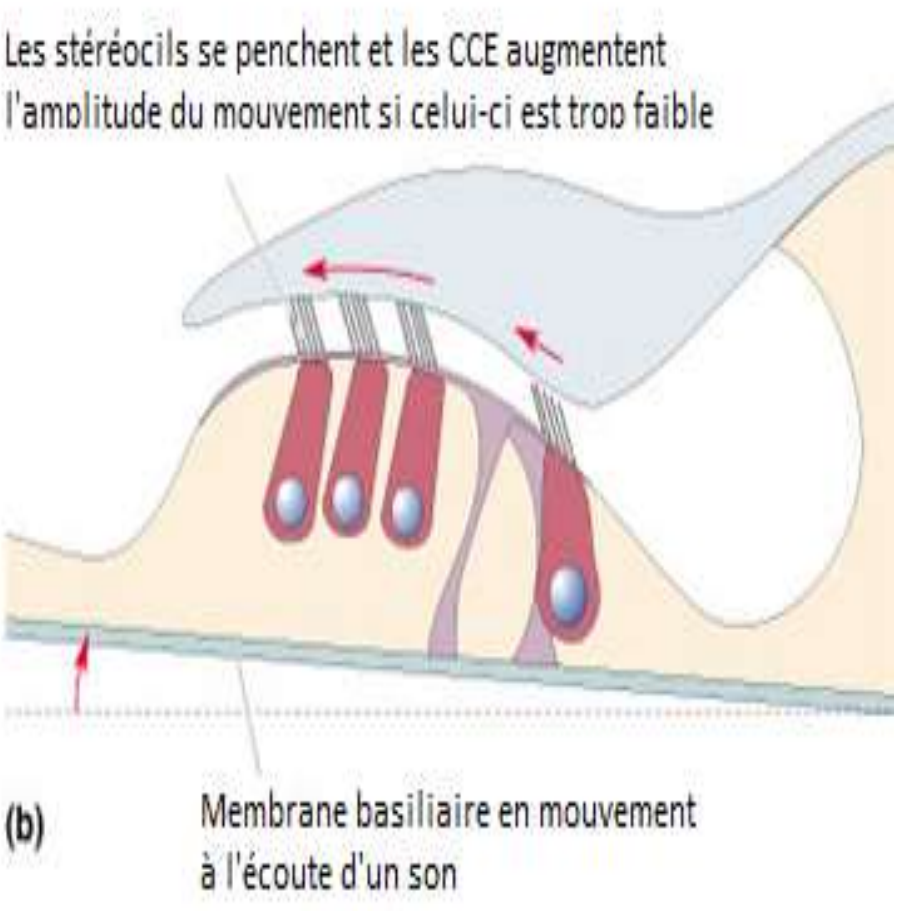
Transduction du signal par les cellules ciliées

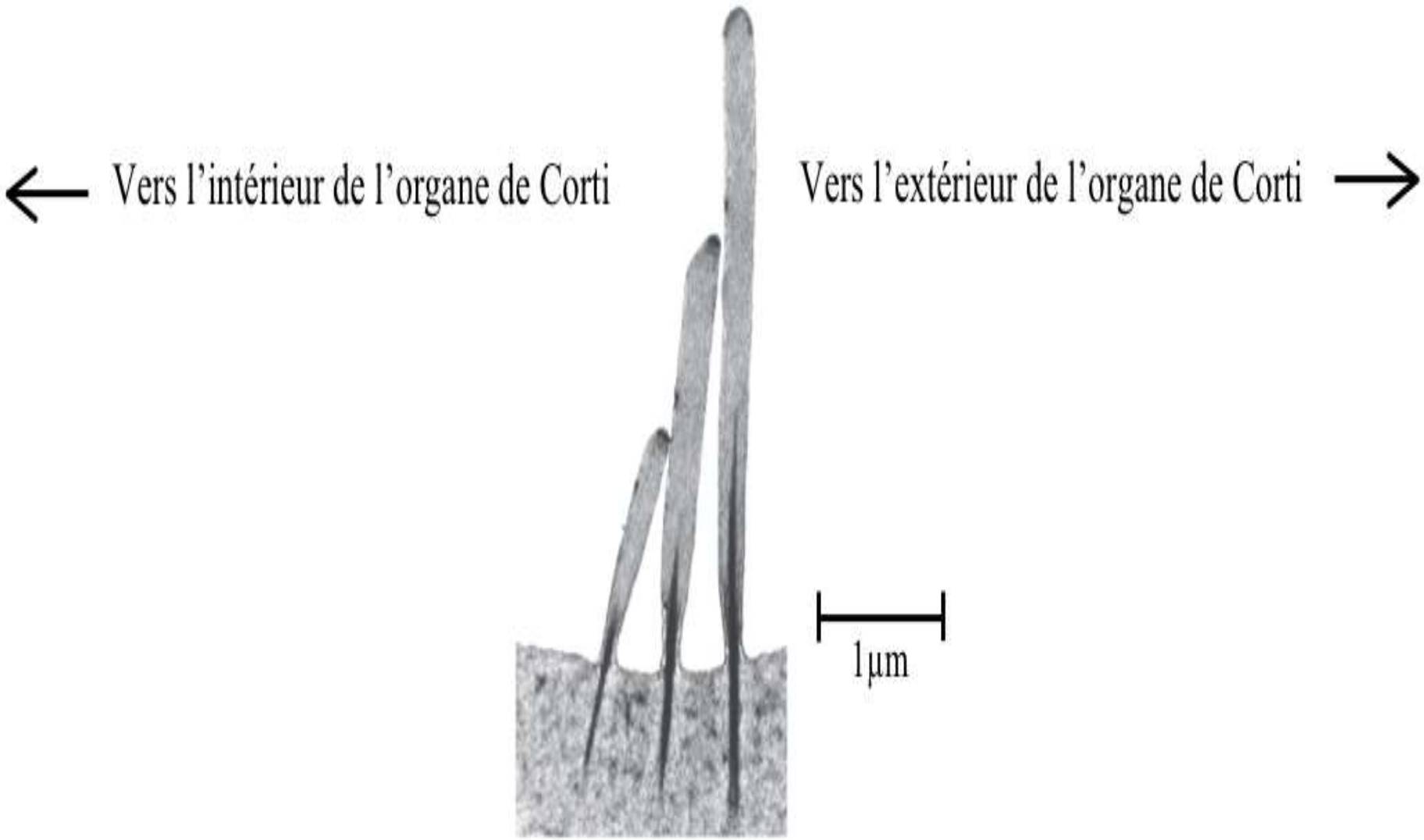
- Le déplacement de l'onde propagée
- Mouvements de cisaillement entre la membrane basilaire et la membrane tectoriale sus jacente
- Les stéréo cils des cellules sensorielles sont le siège de la transduction mécano-électrique,
- Déflection des cils des stériocils des cc
- Modification du potentiel de membrane des cc
- L'inclinaison des stériocils vers l'exterieur entraine l'ouverture des canaux K permet l'entrer du K selon le gardent électrique
- Ddp entre l'endolympe et périlymphe : +80
- DDP entre périlymphe et cc : -90

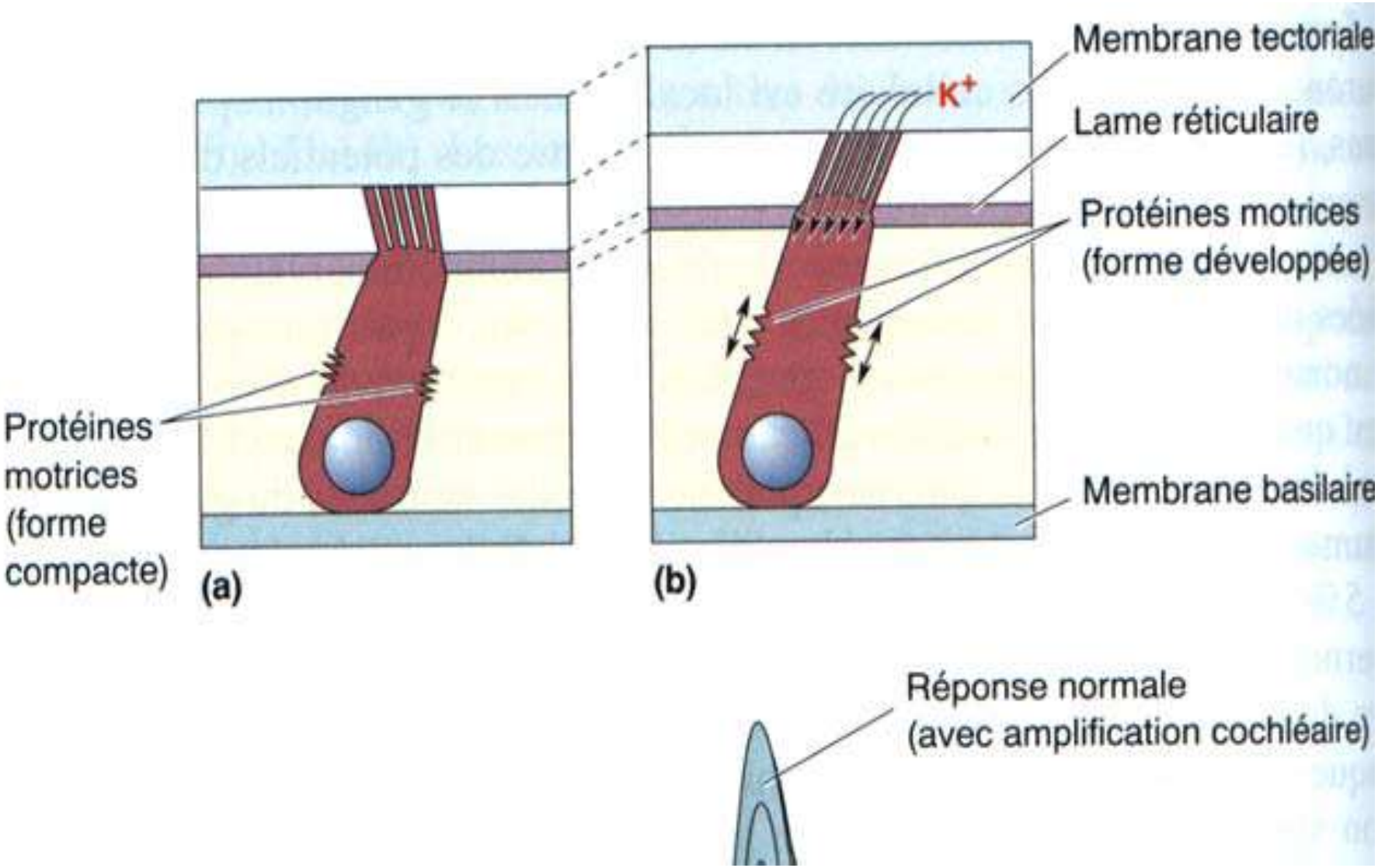
Donc ddp entre endolymphe et cc :-150

Entrée du k entraine une dépolarisation des cc

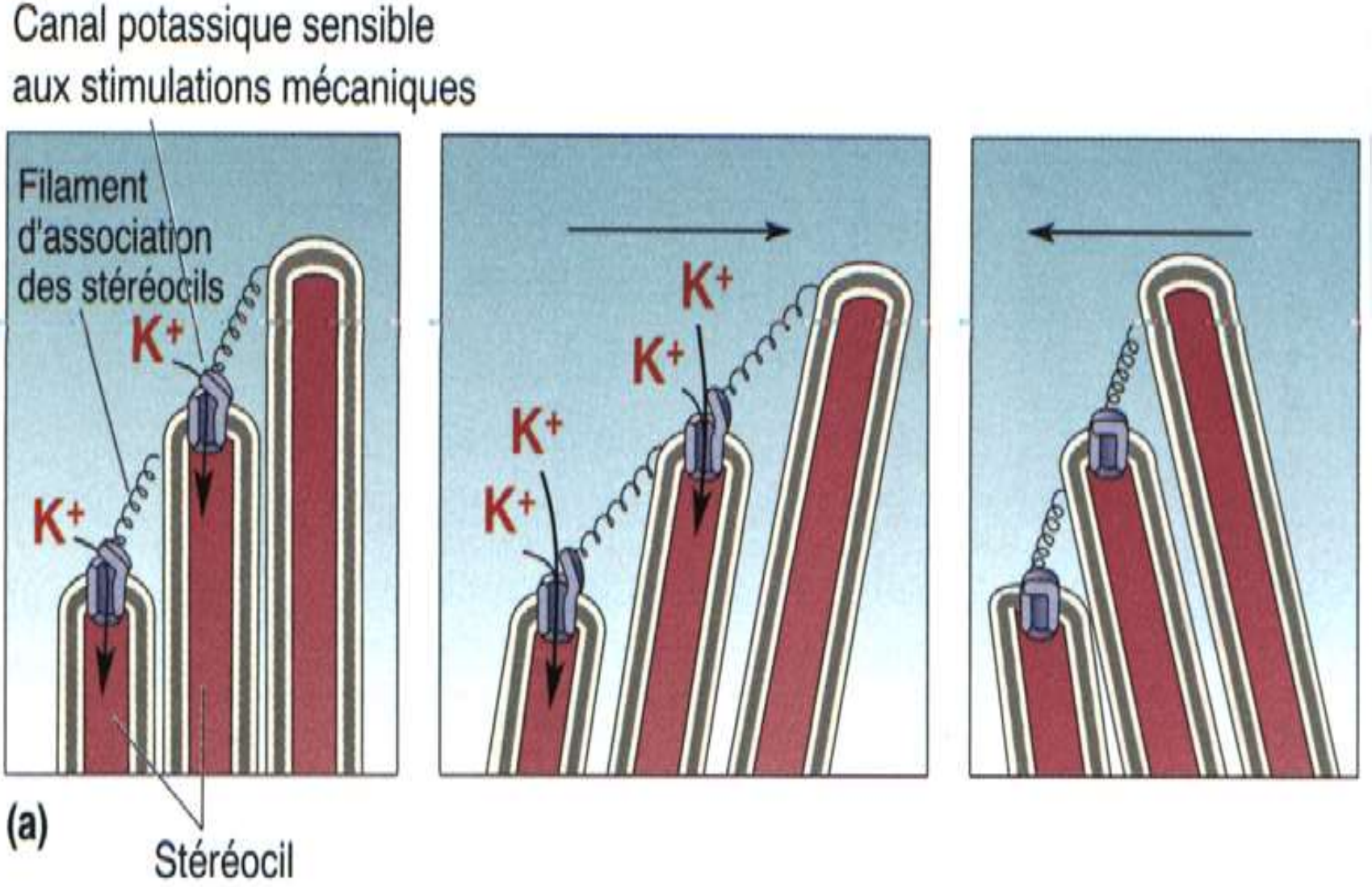

Membrane tectoriale
Reticular lamina
Stéréocils
(a)
Cellules ciliées externes
Membrane basiliaire
Cellule ciliée interne


Les stéréocils se penchent et les CCE augmentent l'amplitude du mouvement si celui-ci est trop faible
(b)
Membrane basiliaire en mouvement à l'écoute d'un son

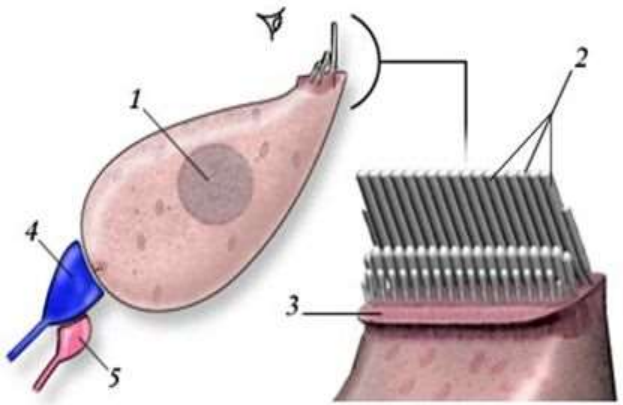

Vers l'intérieur de l'organe de Corti
Vers l'extérieur de l'organe de Corti
1µm


Membrane tectoriale
K+
Lame réticulaire
Protéines motrices
(forme développée)
Protéines
motrices
(forme
compacte)
Membrane basilaire
(a)
(b)
Réponse normale
(avec amplification cochléaire)

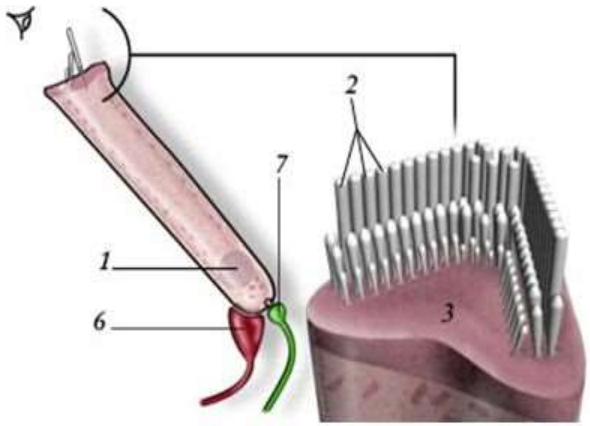
Stériocils des cc



Cellules ciliées



3500



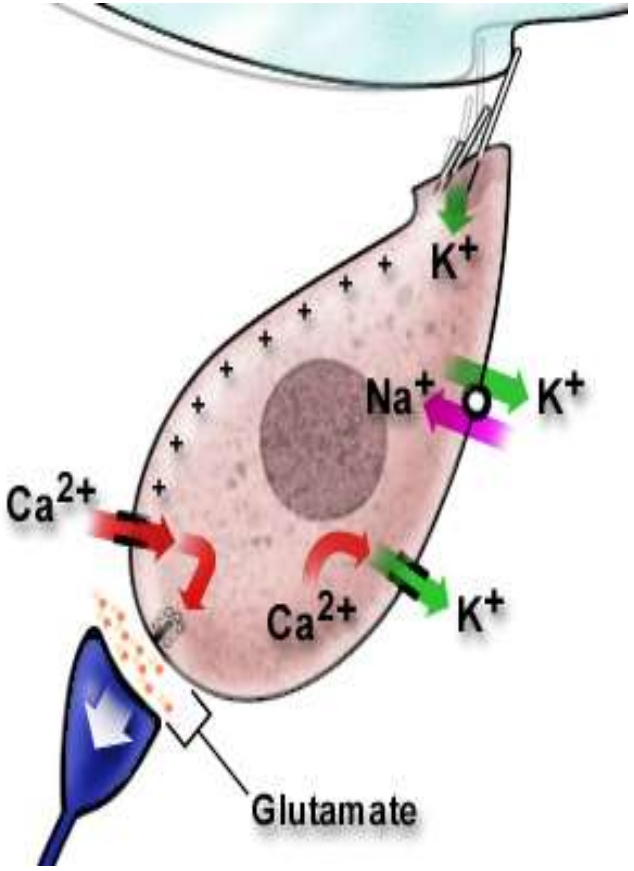
12500

1. Noyau
2. Stéréocils
3. Plaque cuticulaire
4. Nerf auditif (neurone de type I)
5. Efférence latérale
6. Efférence médiane
7. Nerf auditif (neurone de type II)

- **Au niveau des CCI**:
- Véritables cellules sensorielles
- Connectées à la quasi-totalités des neurone de type I
- 95./° des fibres du nerf auditif
- Assure la transduction mécano électrique
- La dépolarisation provoque l'ouverture de canaux calciques sensible au potentiels
- Entrer du ca
- Fusion des vésicules et exocytose du transmetteur :glutamate
- Se fixe sur les récepteur induit un potentiel de récepteur au niveau des fibres auditif afférentes proportionnel à l'amplitude de l'inclinaison des cils.

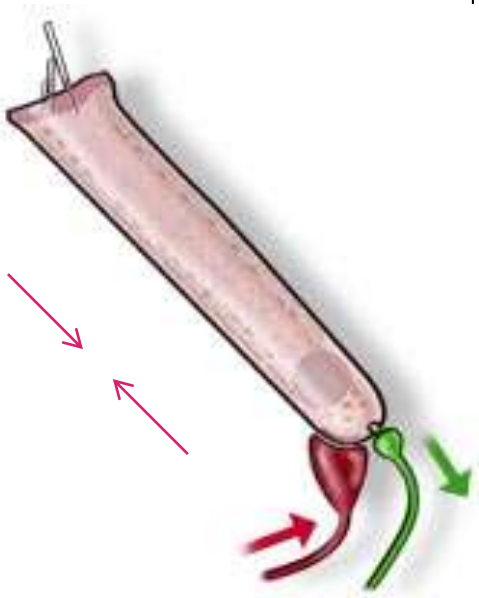
C C Interne

- -**BASCULEMENT DES CILS**
-
- -**ENTRÉE DE K+ AU NIVEAU DU**
- **POLE APICALE**
- ***(GRADIENT ÉLECTRIQUE)***
-
- -**DÉPOLARISATION DE LA CCI**
-
- -**OUVERTURE DES CANAUX CA++**
-
- -**LIBÉRATION DU NEUROMÉDIATEUR *(GLUTAMATE)***
-
- -**SORTIE DU K+ À PARTIR DE**
- **CANAUX K+ CA++ DÉPENDANT**
- **ET CANAUX K+ VOLTAGE**
- **DÉPENDANT *(GRADIENT DE***
- ***CONCENTRATION)***
- -**DÉPOLARISATION DE LA CCI**



- **Au niveau CCE:**
- La propriété physiologique majeurs des cc est l'éléctromotilité
- Mécanisme actif d'amplification
- Codage de sensibilité et de sélectivité en fréquence
- Coder de manière différentielle les fréquences très proches
- La dépolarisation due à l'entrer du k provoque la contraction des CCE modifie le couplage entre membrane basilaire et tectoriale et amplifie localement les vibrations de la membrane basilaire

CCE



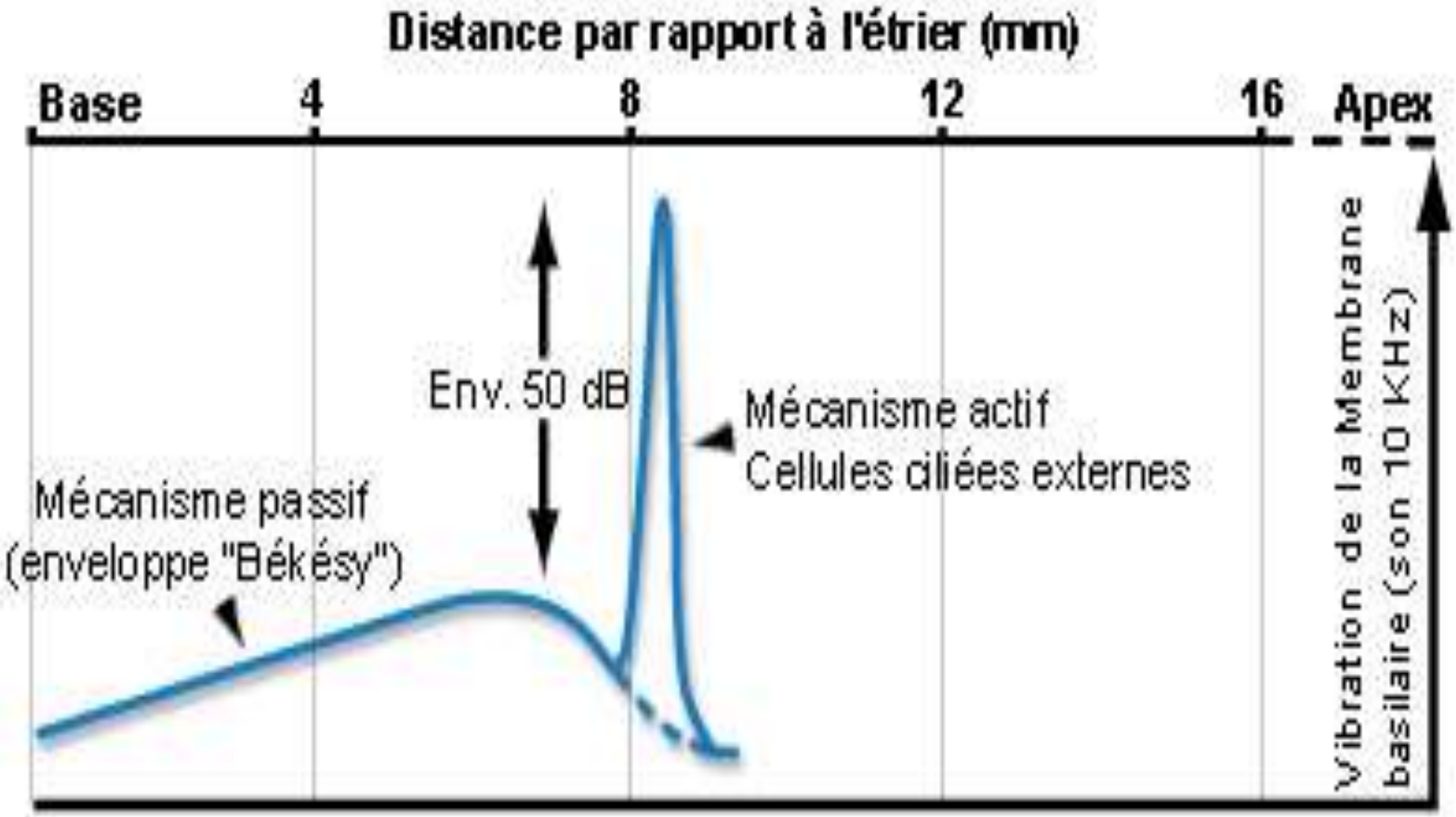
Electromotilité= propriété contractile des CCEs, due à **la prestine** (protéine transmembranaire qui se **raccourcit** lors de la dépolarisation et **allongemen**t lors de la repolarisation cellulaire (rôle du cl-) → **variation de longueur de la CCE au rythme de la fréquence acoustique**

amplification des mouvements de la membrane tectoriale →CCI

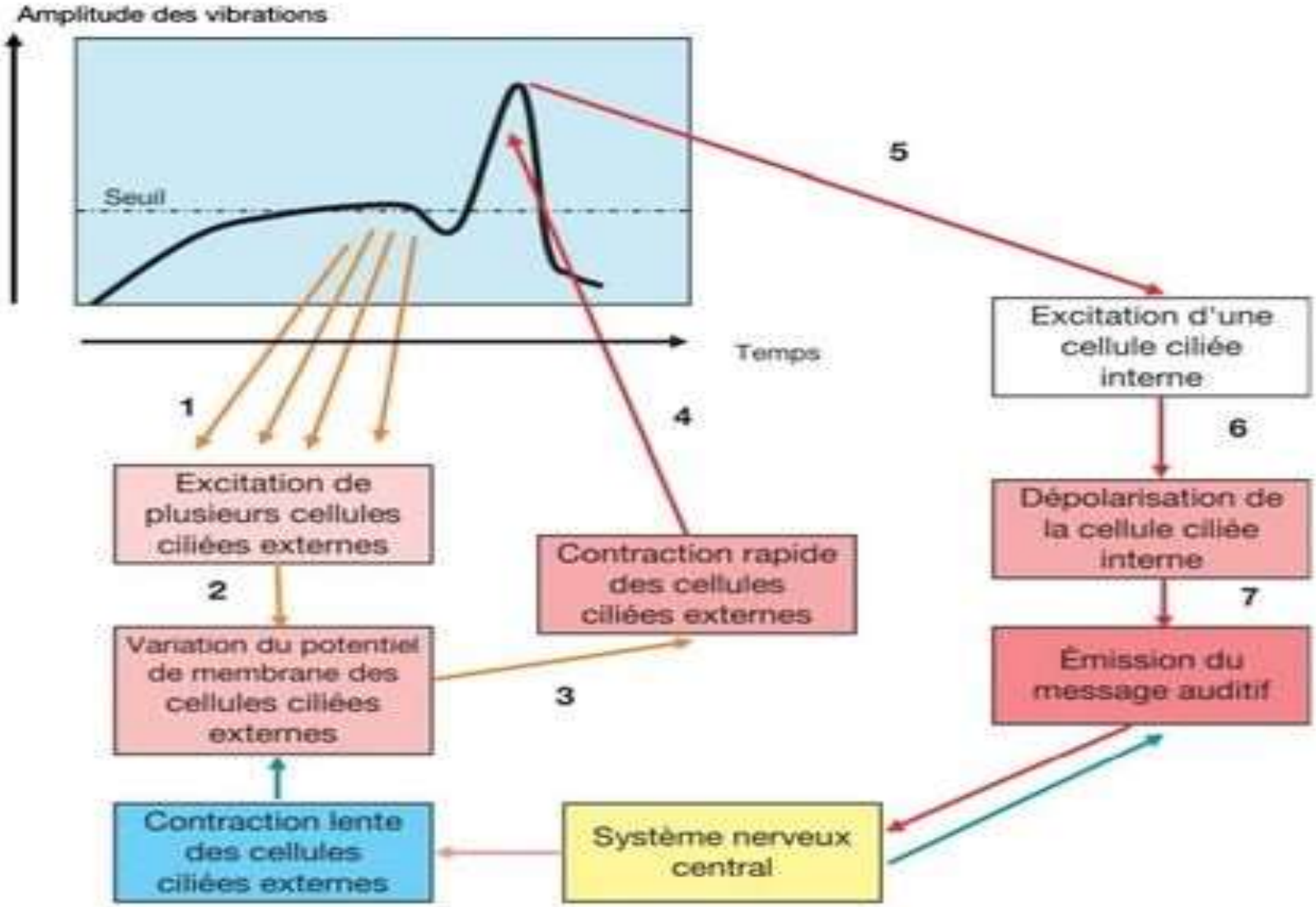
Action des CCE modulée par le système efférent.

- le mécanisme actif amplifie (env. + 50 dB) la vibration de la membrane basilaire (ce qui augmente la sensibilité de la cochlée) sur une portion très étroite de l'organe de Corti
- Deux fréquences très proches peuvent donc activer deux zones distinctes de la cochlée permettant ainsi de les distinguer l'une de l'autre (sélectivité en fréquences).
- et se retrouve à l'identique au niveau des fibres du nerf auditif auquel il est fidèlement transmis par les CCIs par l'intermédiaire de la membrane tectoriale.

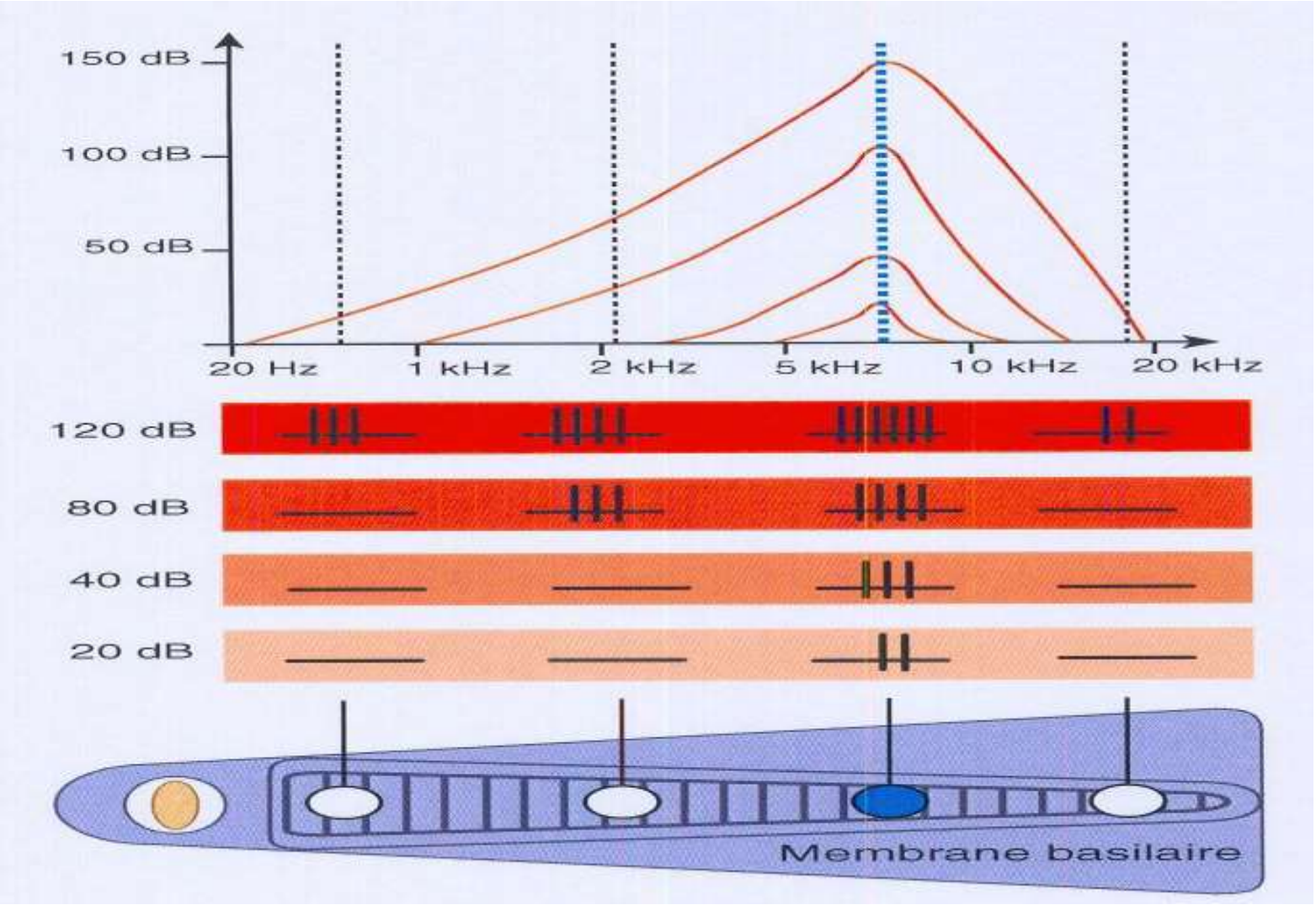
CCEs et processus mécaniques actifs de la cochlée



- La repolarisation des CC interne ou externe est due à un courant sortant de k due à l'ouverture des canaux k calcium dépendant ,canaux k voltage dépendant localisés dans les parois latérales des cc.
- Le calcium est soit pompé à l'extérieur de la cellule ou séquestrés dans le réticulum endoplasmique.

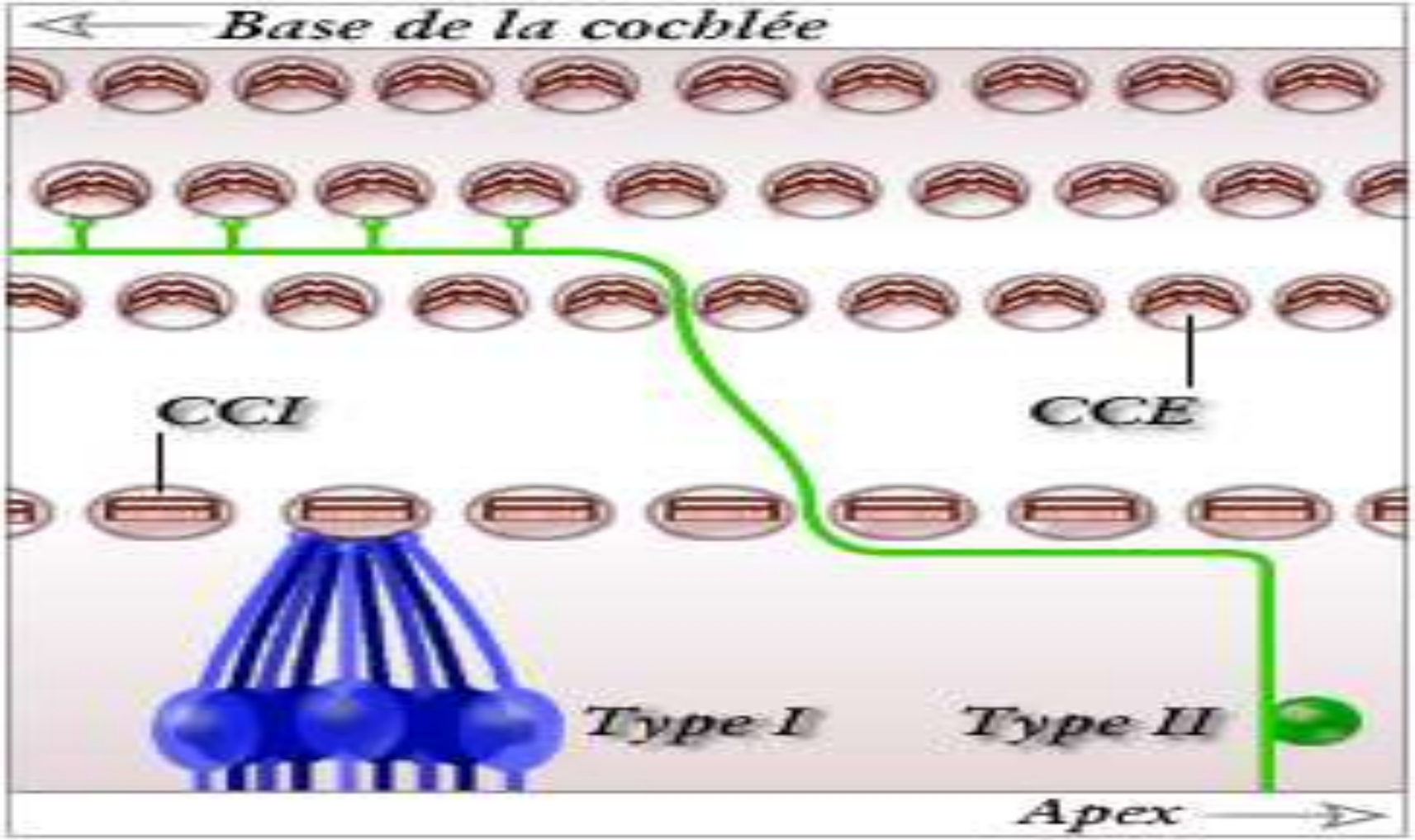

Amplitude des vibrations
Seuil
Temps
1
2
3
4
5
6
7
Excitation de plusieurs cellules ciliées externes
Variation du potentiel de membrane des cellules ciliées externes
Contraction lente des cellules ciliées externes
Contraction rapide des cellules ciliées externes
Excitation d'une cellule ciliée interne
Dépolarisation de la cellule ciliée interne
Émission du message auditif
Système nerveux central

Codage des sons par les cci

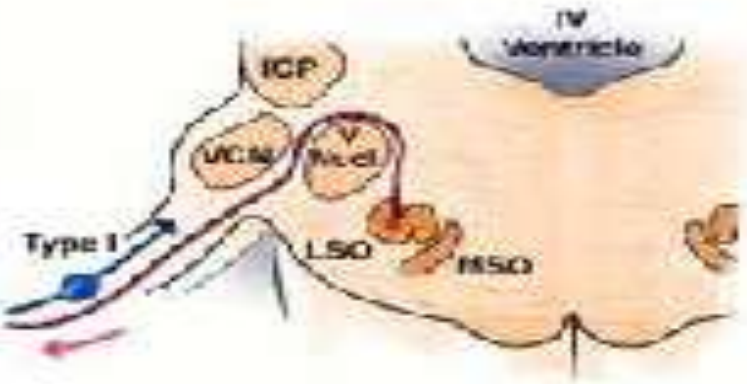


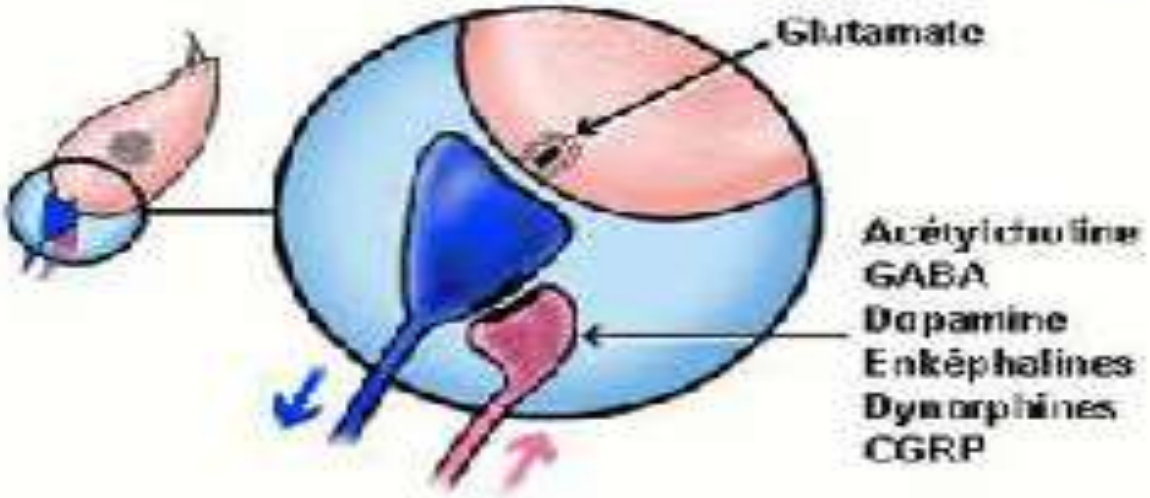
Innervation afférente

importance de l'innervation des cellules ciliées internes

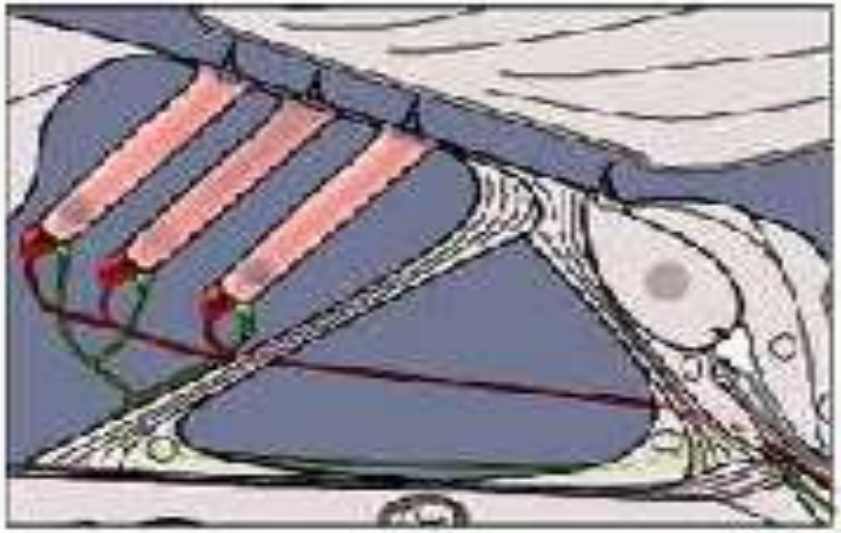


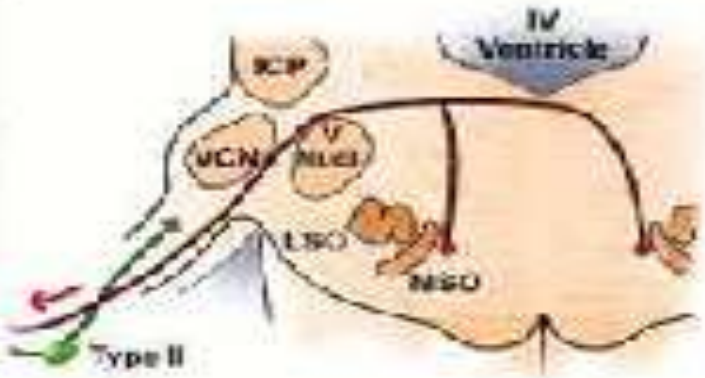
- Les axones myélines de conduction rapides des ccI présentent un haut degrés de divergence
- Les cellules externes envoient leurs messages vers le système afférent spirale par des fibres non myélinisées (5pour cent des fibres du nerf auditif) Haut degrés de convergence
- En retour le SNC peut contrôler l'électromotilité (système efférent médian) :neurones situés bilatéralement dans complexe olivaire supérieur médian.
- la synapse entre la cellule ciliée interne et le nerf auditif (système efférent latéral):olive supérieur homolatéral :protège la synapse contre un traumatisme sonore.

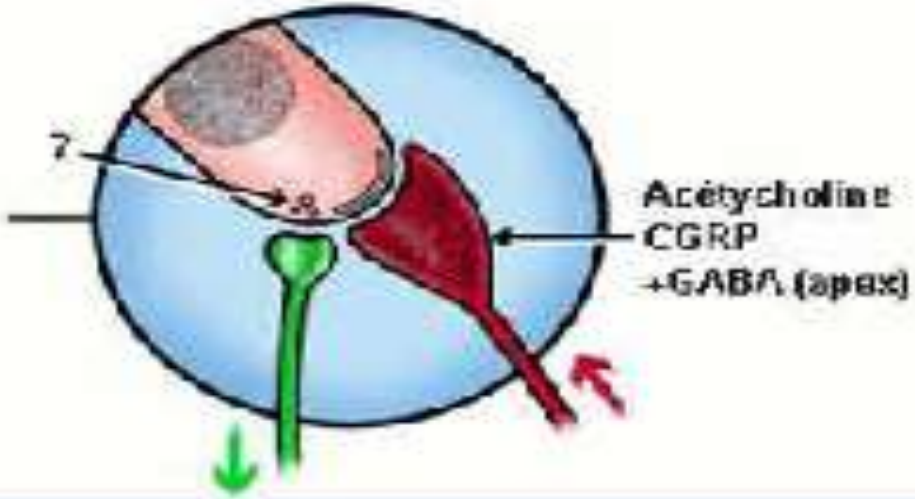




Innervations de la cellule cilié interne







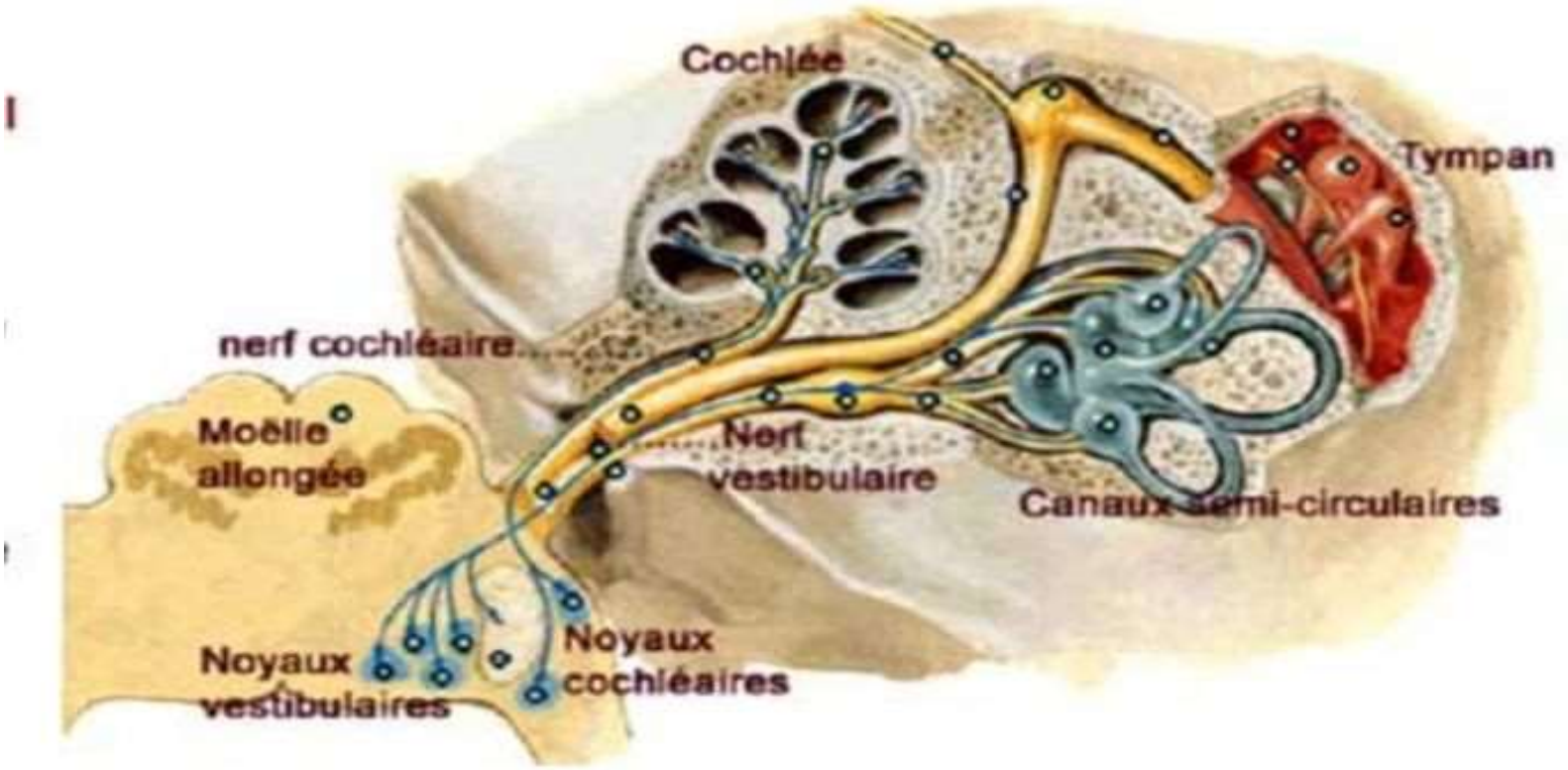
Les cellules ciliées externes et leurs innervations

Rôle des cellules auditives

- **Les axones des cellules internes**
- myélinisées, rapides vers le **noyau cochléaire**
- haut degré de divergence,
- 3.500 cellules internes divergent vers 20.000 fibres auditives
- les seules à participer directement à l'audition.
- **Les axones des cellules externes**
- fibres non myélinisées, lentes vers le système afférent spiral (5 %du nerf auditif)
- haut degré de convergence,
- 20.000 cellules externes convergent vers 1.000 fibres auditives
- rôle encore incompris

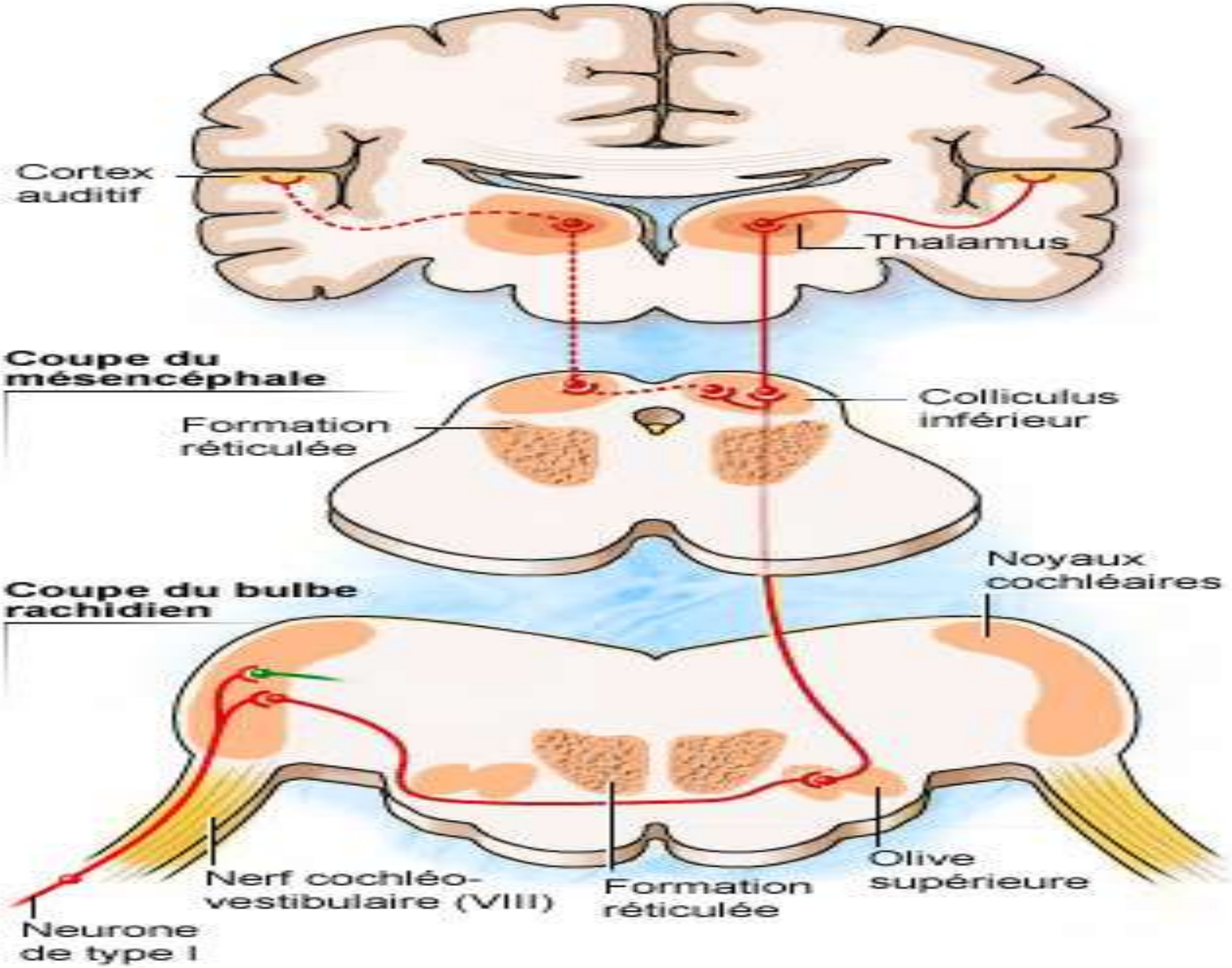
Le noyau cochléaire

- Premier relais centrale des voies auditives ascendantes
- Ses afférences sont strictement unilatérales.
- Les fibres nerveuses issues du ganglions spirales de corti font synapse dans les noyaux cochléaires dorsaux et ventraux . Organisation tonotopique: basse fréquence à la surface et haute fréquence pénètre profondément



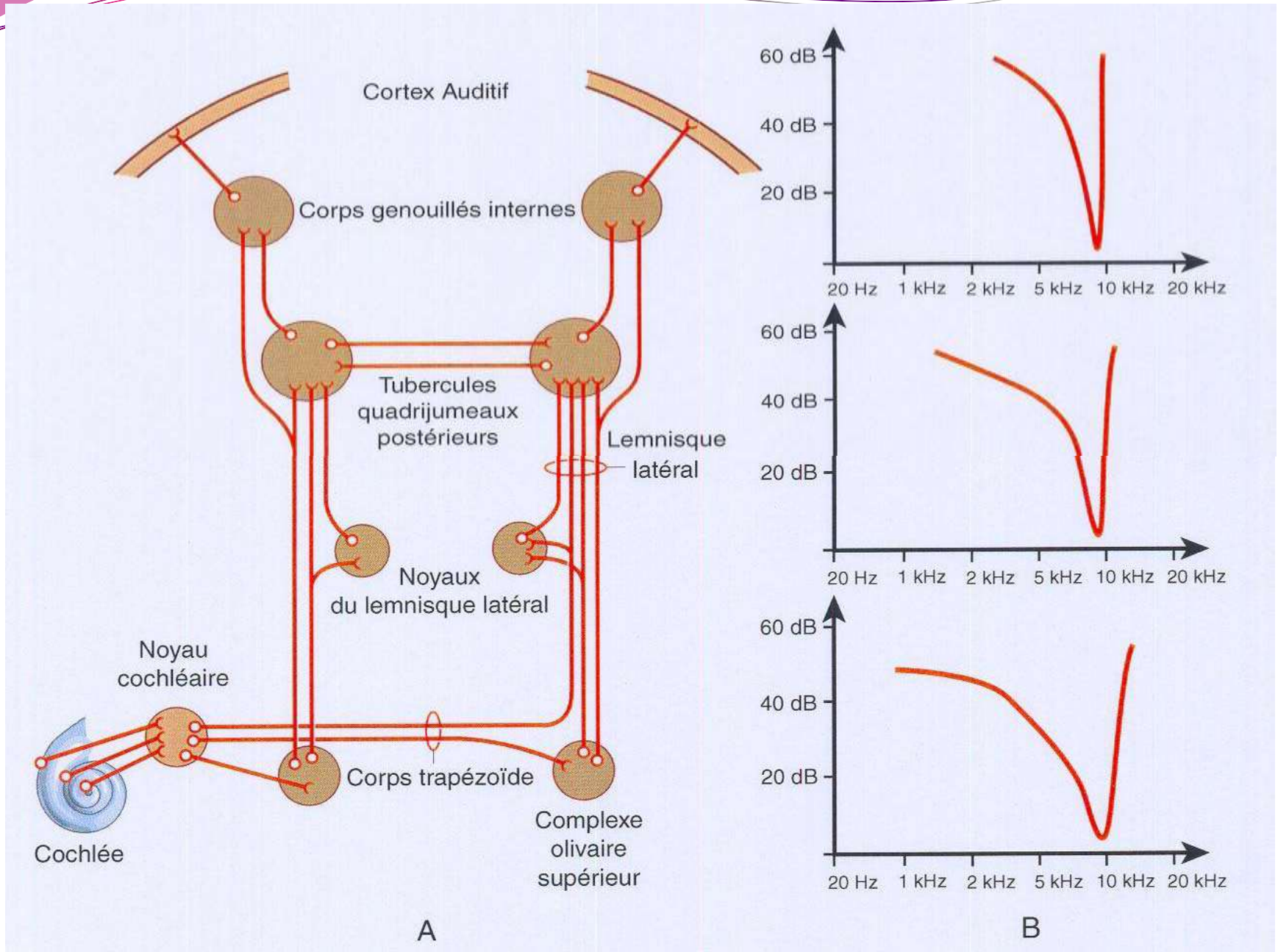
Voies auditives ascendantes

- A la sortie du noyaux cochléaires ,les axones rejoignent les structures supérieurs après de nombreux relais avant d'arriver au cortex.
- Grosses fibres myélinisées
- Les axones des NC rejoignent principalement les COS ,projection bilatérales.
- Les axones qui rejoignent le COS controlatérales forment le corps trapézoïde.
- Les voies auditives sont complexes et redondantes avec projections bilatérales dès le COS . ce qui explique que seule les atteintes bilatérales entraine une surdité importante.


Cortex auditif
Thalamus
Coupe du mésencéphale
Formation réticulée
Colliculus inférieur
Noyaux cochléaires
Coupe du bulbe rachidien
Nerf cochléo-vestibulaire (VIII)
Formation réticulée
Olive supérieure
Neurone de type I

- Elles se projette bilatéralement avec une prédominance des voies croisées.
- Des relais étagées composées de nx de substances grises sont présent à chaque niveau de l'encéphale.
- A chaque étages ,des commissure permettent le croisement des vx auditives ascendantes (fibres commissurales).
- Chaque relais effectue un travail de décodage et d'interpretation.

Voies auditives et inhibition latérale

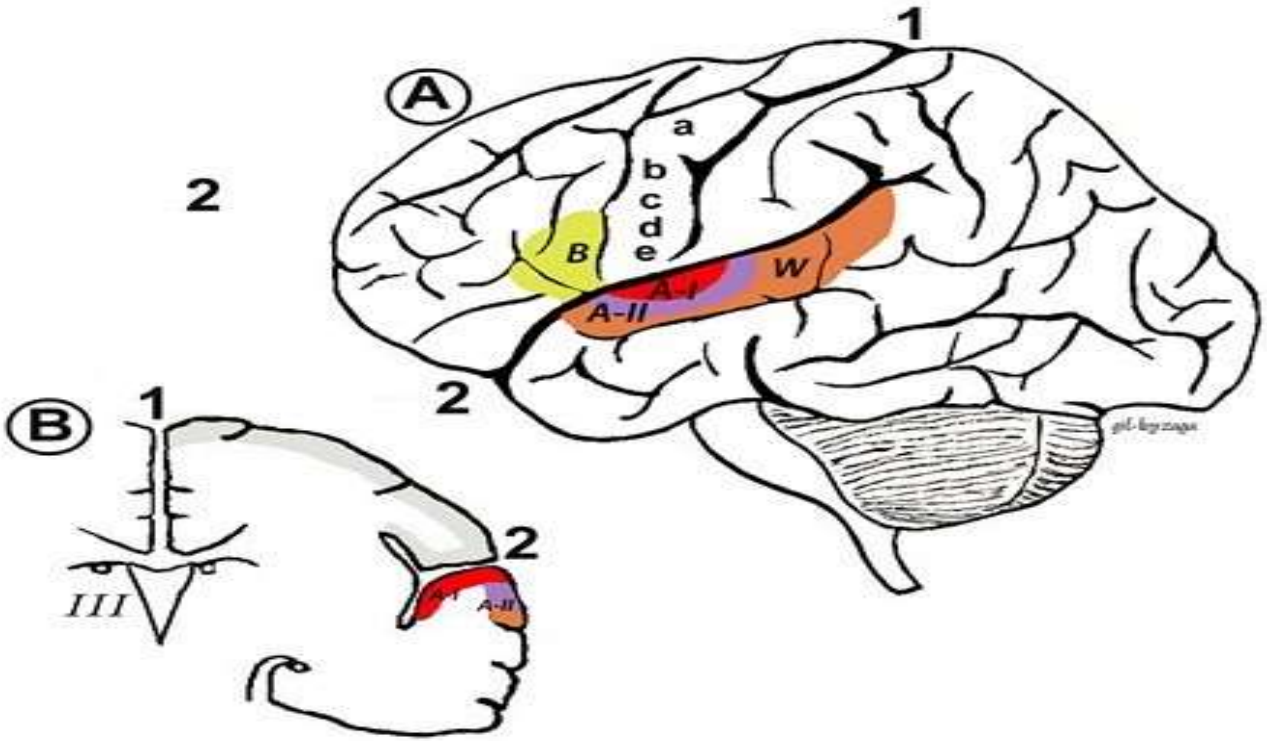


Inhibition latérale

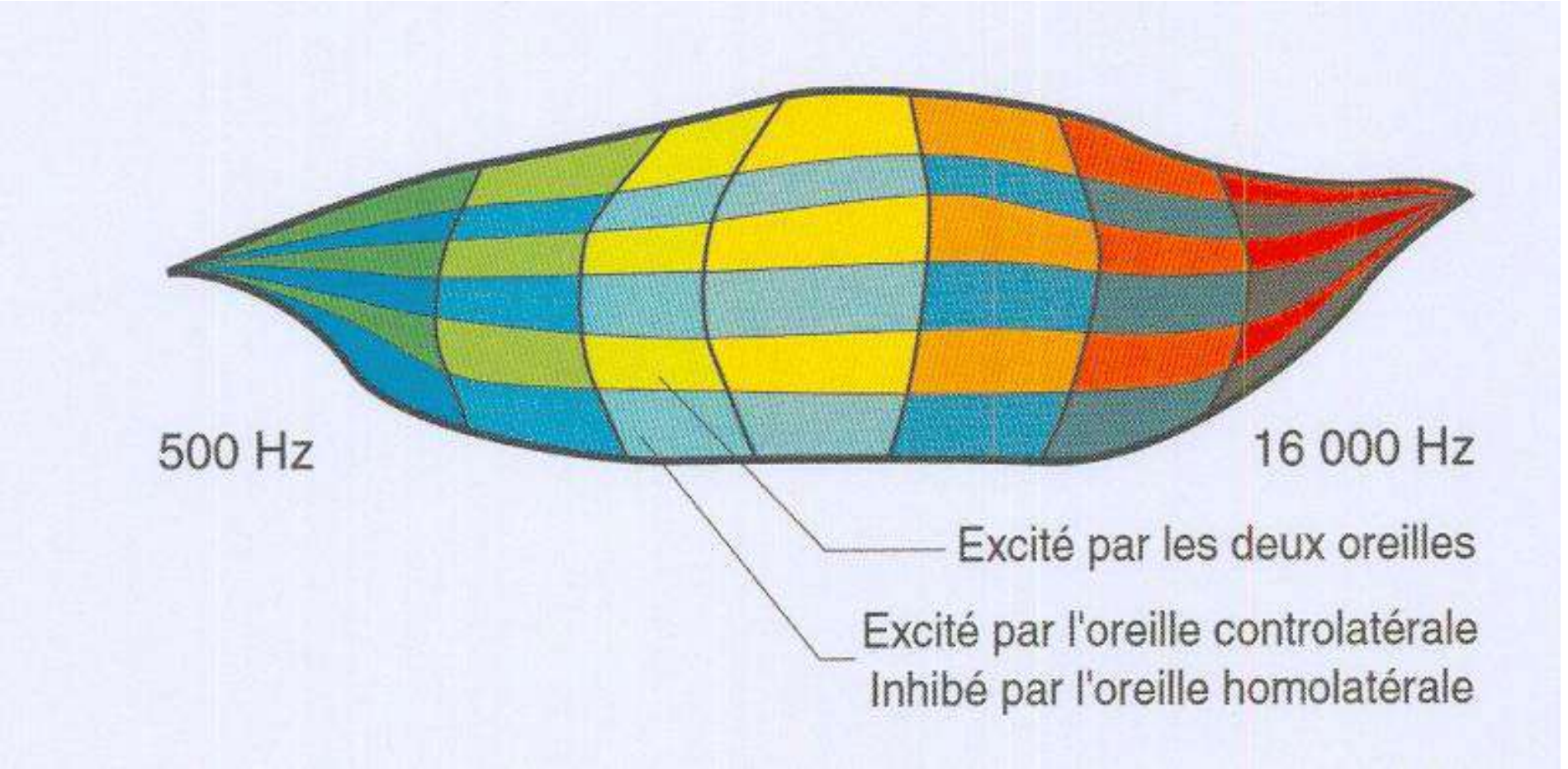
- Au fur et à mesure du passage des différent relais ,les neurones des voies auditives répondes à une gamme de fréquence de plus en plus étroites ,c'est l'organisation tonotipique tous au long des voies auditives qui permet ce filtrage par inhibition latérale :une cellule qui code une fréquence préférentielle inhibe ses voisines.

Cortex auditif

- Situé dans la partie sup du le lobe temporal, profondément enfoui au fond de la scissure Sylvienne.sur sa berge inf au n du gyrus de ESCHL
- L'aire auditives primaire (aire 41 de brodmann) à coté de l'aire de Wernicke(w),reçoit des projections directe de la VA ascendantes.
- L'aire auditives secondaire II placées plus rostrale ment dans le lobe temporal: aire 42 de BRODMANN
- Les aires polymodales situées au niveau des régions antérieurs et anférolatéral du lobe temporales



Organisation en colonnes :fonctionnelles modules répondant chacune à une dimensions acoustique :la fréquence, la binauralité: stimulée par l'oreille controlatéral, inhibée par stimulation de l'oreille homorolatéral



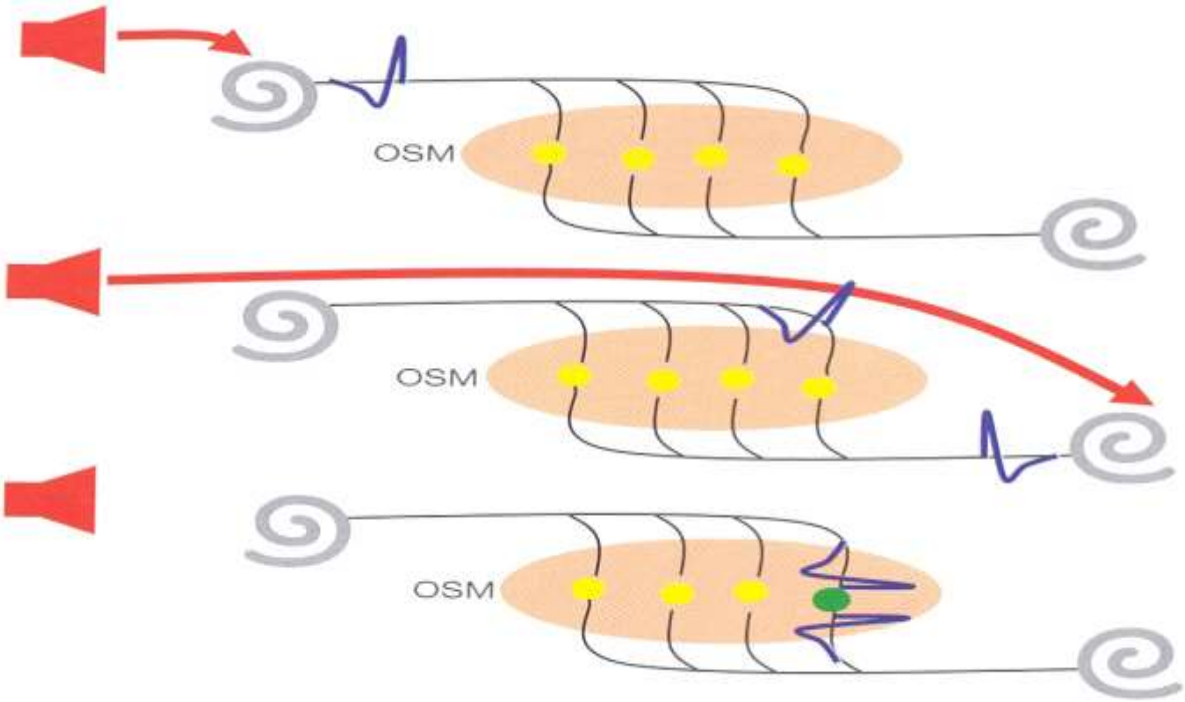
La localisation des sons

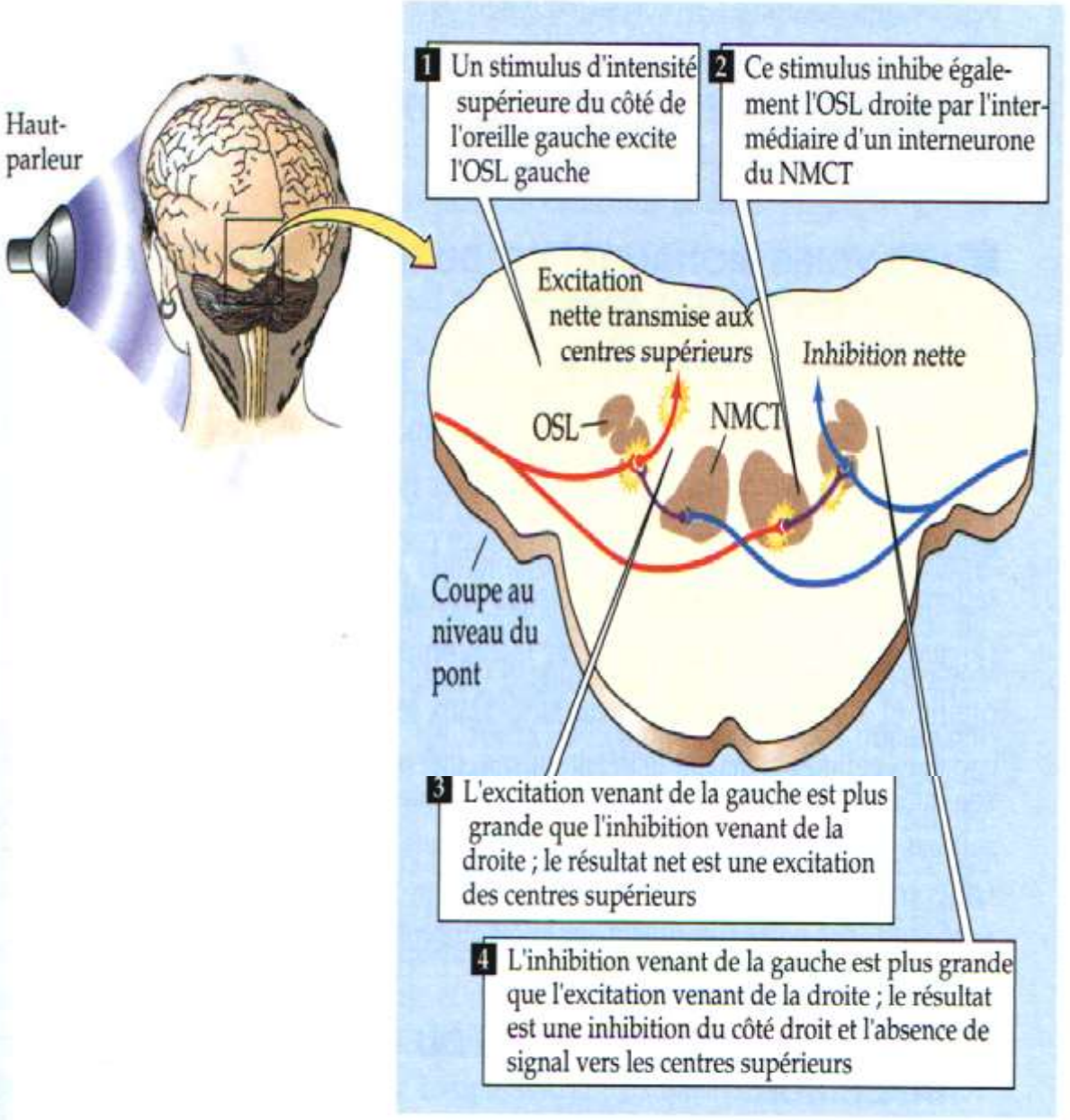
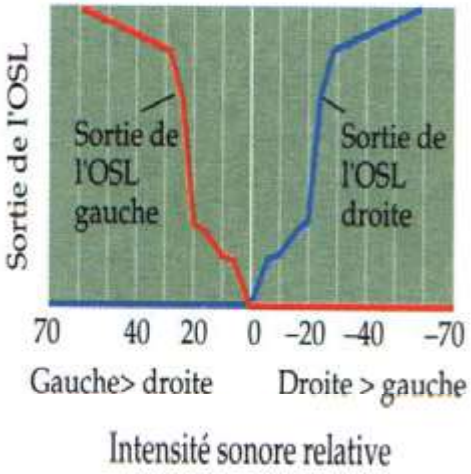
- Le traitement de la localisation des sons dans l'espaces a lieu essentiellement dans l'olives inférieur via deux mécanisme:
- **Différence de phase**:
- Dans l'olive supérieur médian: utilise la différence de latence d'arrivée des potentiels d'action prédominant pour les basses fréquences.
- **Différence d'intensité:**
- Pour les sons de fréquences élevés.
- Neurones localisés dans olives supérieur latéral

La localisation des sons

- Le traitement de la localisation des sons dans l'espaces a lieu essentiellement dans l'olives inférieur via deux mécanisme:
- **Différence de phase**:
- Dans l'olive supérieur médian: utilise la différence de latence d'arrivée des potentiels d'action prédominant pour les basses fréquences.
- **Différence d'intensité:**
- Pour les sons de fréquences élevés.
- Neurones localisés dans olives supérieur latéral

Différence de phase



Localisation des sons par la temporalité. De bas en haut : le son arrive d'abord au niveau de la cochlée la plus proche et déclenche un potentiel d'action qui est émis vers le complexe olivaire supérieur médian (OSM). Le son arrive plus tard au niveau de la cochlée hétérolatérale, et le potentiel d'action est donc émis plus tard. Selon la différence de latence des sons, les potentiels d'action arrivent simultanément sur un des neurones, qui va donc coder cette différence de latence et pouvoir déterminer d'où vient le son.

Différence d'intensité